

СПбГУТ)))

Санкт-Петербургский государственный университет
телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

15th INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCED INFOTELECOMMUNICATIONS ICAIT
XV Международная научно-техническая и научно-методическая конференция
«Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании»



АПИНО
ICAIT



2026

СБОРНИК НАУЧНЫХ СТАТЕЙ

ТОМ 1

APINO.SUT.RU



УДК 001:061.3(082)
ББК 72

А 43 XV Международная научно-техническая и научно-методическая конференция
«Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании»
(АПИНО 2026); сб. науч. ст. в 2-х т. / Под. ред. А. В. Рабина; сост. А. А. Дзюбаненко,
И. М. Татарникова. СПб.: СПбГУТ, 2026. Т. 1. 924 с.

Рецензент – исполнительный директор
ООО «СПИЧАП», доктор технических наук,
доцент **Басов О. О.**

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ

Председатель

Киричек Р. В. – доктор технических наук, профессор,
ректор СПбГУТ

Заместитель председателя

Рабин А. В. – доктор технических наук, доцент,
проректор по научной работе СПбГУТ

Ответственный секретарь

Дзюбаненко А. А. – кандидат технических наук,
доцент, начальник управления организации научной
работы и подготовки научных кадров СПбГУТ

Члены программного комитета

Елагин В. С. – кандидат технических наук, доцент,
и.о. декана факультета инфокоммуникационных сетей
и систем СПбГУТ

Владыко А. Г. – кандидат технических наук, доцент,
декан факультета радиоэлектронных систем
и робототехники СПбГУТ

Литвинов В. Л. – кандидат технических наук, доцент,
и.о. декана факультета информационных технологий
и программной инженерии СПбГУТ

Зикратов И. А. – доктор технических наук, профессор,
декан факультета кибербезопасности СПбГУТ

Шутман Д. В. – кандидат политических наук, доцент,
декан факультета социальных технологий и экономики
данных СПбГУТ

Гирш В. А. – полковник, начальник военного учебного
центра СПбГУТ

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

Председатель

Абилов А. В. – кандидат технических наук, доцент,
первый проректор – проректор по учебной работе
СПбГУТ

Сопредседатель

Савченко А. Ю. – проректор по молодежной политике
и воспитательной работе СПбГУТ

Ответственный секретарь

Татарникова И. М. – шеф-редактор объединенной
редакции рецензируемых научных изданий СПбГУТ

Члены организационного комитета

Мишутина Е. С. – директор департамента экономики
и финансов СПбГУТ

Ивасишин С. И. – кандидат технических наук, директор
департамента организации и качества образовательной
деятельности СПбГУТ

Лысов А. Н. – директор департамента по эксплуатации
и развитию материально-технического комплекса
СПбГУТ

Гуршал К. Ю. – начальник управления маркетинга
и рекламы СПбГУТ

Зыкова Н. В. – начальник управления информационно-
образовательных ресурсов СПбГУТ

Лупой Р. С. – начальник управления информатизации
СПбГУТ

В научных статьях участников конференции
исследуются состояние и перспективы развития мирового
и отечественного уровня IT и телекоммуникаций. Предлагаются
методы и модели совершенствования научно-методического
обеспечения отрасли связи и массовых коммуникаций.

Предназначено для научных работников, аспирантов,
студентов старших курсов телекоммуникационных вузов,
инженерно-технических работников и специалистов отрасли
связи.

Сайт конференции
www.apino.sut.ru

ISBN 978-5-89160-403-2 (Том 1)
ISBN 978-5-89160-402-5

© СПбГУТ, 2026

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫЕ СЕТИ И СИСТЕМЫ	13
Абрамова Н. И., Воробьев П. В., Лящук М. З. Сравнение централизованного и децентрализованного доступа к сетям передачи информации	13
Алексеев А. И., Канаев А. К. Перспективные направления для применения технологии сетей, чувствительных ко времени, на железнодорожном транспорте	17
Андреева Е. И., Нестеров О. Д. Применение бриллюэновского рассеяния в устройствах фотоники	23
Антипин Б. М., Виноградов Е. М. Электромагнитная обстановка в полосах частот совместного использования радиовещательной спутниковой службы и современных систем связи	27
Багаев Е. С. Анализ влияния числа FTM-кадров на точность измерения расстояния	33
Батенков К. А. Анализ чувствительности требуемой емкости каналов связи к нагрузке в системах с потерями на основе формулы Эрланга-В	39
Бачагов И. С. Анализ существующих систем мониторинга поведения водителей с использованием компьютерного зрения	45
Белов М. А., Меразга М. Н., Мутханна А. С. А. Динамическая кластеризация распределенных SDN-контроллеров для инфраструктуры CitiVerse	51
Богданова Е. И., Дашков М. В., Смыслов И. С. Образовательный комплекс по дисциплине «Квантовая связь»	58
Богданова Е. И., Евтушенко А. С., Никулина Т. Г., Яблочкин К. А. Исследование механических характеристик оптических волокон различных производителей	64
Борисова А. А., Быкова Л. Е., Стариков В. В. Развитие технологии трассировки лучей в сетях мобильной связи	70
Бучатский А. Н., Кузьмина Д. Д. Цветовая несогласованность виртуальных и реальных объектов в системах смешанной реальности: анализ причин возникновения и подходов к ее устранению	76
Бучатский А. Н., Лосев А. П. Клинически-ориентированная функция потерь для эффективного нейросетевого сжатия эндоскопических изображений	81

Былина М. С., Фраз А. В. Исследование и моделирование статического Фурье-спектрометра для телекоммуникационных сетей в DWDM диапазоне	87
Вахнюк К. Д., Ибрагимов Р. З., Иванов А. Ф., Салеев А. Р., Симонов И. М., Яковлев К. А., Ярыгин М. А. Внедрение технологии квантового распределения ключей в классическую систему со спектральным мультиплексированием каналов	92
Вершинина К. В. Анализ основных проблем иммерсивной коммуникации и тактильного интернета	98
Вершинина К. В., Мутханна А. С. А. Международная деятельность в области выбора пути миграции сервисов в сетях туманных вычислений	103
Викулов А. С., Окунева А. В. Анализ развития механизмов обеспечения качества обслуживания в сетях стандартах IEEE 802.11	109
Викулов А. С., Потехина А. А. Оценка влияния тела оператора на натурные измерения характеристик радиопокрытия сетей IEEE 802.11	115
Владимиров С. С., Резинкин Д. В., Рыбаченко В. А., Федоренко А. Д. Проект беспроводной сенсорной сети для городской квартиры в многоквартирном доме	119
Владимиров С. С., Хоанг К. Т. Метод NIL-CR для частичного восстановления пакетов в RLNC на основе иерархической локализации с перемежением	125
Волостных В. А., Задбоев В. А., Шевченко А. А. О подготовке специалистов для подразделений технической защиты информации государственных информационных систем	130
Ворончук В. И., Ногин С. Б., Пантюхин О. И. Технический аспект организации информационной доступности в системе управления силами и средствами оперативного реагирования	136
Воскресенский Е. А., Стариков В. В. Трассировка лучей с подвижными абонентами сетей 5G в среде Sionna RT	139
Галкина М. Ю., Пелин А. А., Савищенко Н. В. Аналитическое и имитационное моделирование помехоустойчивости приема цифровых сигналов КАМ-4 при совместном воздействии АБГШ и прерывистой структурной двухпозиционной фазовой помехи	146
Глаголев С. Ф., Поздняков А. А. Моделирование корреляционного OTDR с использованием кодов на основе матрицы Адамара	153
Гладких Д. С., Перова Н. К., Хлопунов Ф. Д. Оптические системы связи нового поколения: траектории развития и перспективы	159
Гладких Д. С., Перова Н. К., Хлопунов Ф. Д. Современные средства спутниковой связи и их инфраструктурный ресурс	163
Гуминский О. А., Ковалгин Ю. А. Имитационная модель блока частотной синхронизации приемного оборудования системы DRM	168
Давыдов В. В., Толмачев М. А. Сравнительный анализ эффективности конструкций антенн для поиска подземных оптических линий связи	174

Домбровский Я. А., Паращук И. Б., Сабиров Д. Э. Алгоритмы семплирования как потенциальный инструмент повышения оперативности интеллектуального анализа больших объемов данных на инфокоммуникационных ресурсах дата-центров	180
Дорожкин А. Н., Князев О. Ю., Ларьков Д. А., Ненашев Т. Д., Шихалиев Ш. И. Анализ передаточных характеристик аналоговых волоконно-оптических систем связи на основе лазера с прямой модуляцией	186
Доценко С. Э. Исследование взаимодействия линейных и нелинейных эффектов в ВОСС с управлением дисперсией	190
Дюбов А. С. Разработка и применение подсистемы цифровой диагностики волоконно-оптических приемопередающих модулей	197
Дюбов А. С., Колпаков С. В., Рогов С. А. Программное моделирование оптического фурье-процессора для задач корреляционного анализа изображений	203
Елагин В. С., Поляков С. А. Анализ влияния архитектурных особенностей гибридных сетей на характеристики сервисов в соответствии с рекомендациями ITU-T	209
Ерофеев А. Д., Пантюхин О. И. Конвергенция технологий AI, SON и IOT: паттерны, метрики и глобальные тренды с фокусом на Россию	216
Ерофеев А. Д., Пантюхин О. И. Телекоммуникации в эпоху развития искусственного интеллекта	222
Зайцева Е. В. Интеграция производственных кейсов в учебный процесс для формирования профессиональных компетенций в инженерном и горнотехническом образовании	227
Зайцева Е. В., Состина В. М. Применение интерполяции кубическими сплайнами для оценки чувствительности видеокамер, используемых в нефтяных и газовых скважинах	233
Игуменов А. Ю., Марков Р. М., Мельников И. В., Соколов В. А. Многофункциональный волоконно-оптический природный мониторинг	236
Исупова Е. В., Проводин Д. С. Исследование взаимосвязи температурного режима газовой ячейки и стабильности частоты рубидиевого стандарта	242
Качнов А. В., Перес-Кальдерон Д. А. Линейная модель ультразвукового канала: условия и ограничения применимости	248
Качнов А. В., Перес-Кальдерон Д. А. Техническое обучение: восстановление «когнитивного трения» в эпоху генеративного искусственного интеллекта	254
Кожанов Ю. Ф. Свойства интегральных распределений Эрланга и Энгсета	261
Колесников О. В. Динамическая дифференциальная групповая задержка в оптическом кабеле при ударе молнии	271
Константинов Е. С., Федоров С. Л. Методы формирования передаточной функции головы	277

Коржик В. И., Лапшин А. С., Яковлев В. А. Исследование влияния способа обработки данных нарушителем в протоколе распределения ключа по открытым бесшумным каналам	284
Корзун В. А., Пантюхин О. И. Совершенствование методов тестирования программного обеспечения в организациях	290
Коротин В. Е., Тихомиров А. А. Управление задержкой в сетях Wi-Fi 6	295
Коротин В. Е., Фам Б. В. Анализ алгоритмов планирования ресурсов в сетях множественного доступа	300
Коротин В. Е., Фам Б. В. Беспроводной доступ внутри помещений с использованием оптической связи	307
Коротченко В. Д. Экспериментальное исследование передачи видеофайла в узкополосном канале тональной частоты с использованием ортогонального базиса финитных функций	313
Кравец Е. В., Пигарев Н. Д. Исследование нейросетевого предсказателя для компенсации нелинейности усилителей мощности.	318
Крылов С. Е., Парамонов А. И. Анализ стандарта IEEE 802.11bn и применения технологий при построении современных беспроводных сетей связи	324
Лаптева Т. В., Мутханна А. С. Использование облегченных моделей искусственного интеллекта в сетях связи: архитектура, масштабирование и практические сценарии применения	330
Лейкин А. В., Плотников И. П. Методы обеспечения отказоустойчивости частотно-временного обеспечения при деградации сигналов ГНСС	337
Маколкина М. А., Михайлов В. Д. Прогнозирование QoS на основе машинного обучения	342
Маколкина М. А., Трухин В. А. Алгоритм оценки качества обслуживания дополненной реальности с использованием методов компьютерного зрения	348
Мангиров П. В., Паращук И. Б., Селезнев А. В. Оценка эффективности функционирования системы многофакторной аутентификации пользователей инфокоммуникационных сетей на основе адаптивной нейросетевой фильтрации с обучением	354
Матвеев А. С. Анализ перспективных исследований в области Интернета вещей	360
Матвеев А. С. Основы автоматизации рабочих процессов с применением искусственного интеллекта на основе графовых моделей	365
Мещеряков Д. Е., Тишков А. О. Исследование зависимости ошибки позиционирования от качества приема сигналов ГНСС в RTKLIV	372
Морозова Е. А., Фёдоров С. Л. Метод достраивания видеоинформации с использованием U-Net и интерполяции оптического потока	378
Нгуен С. Н., Парамонов А. И. Адаптивная активация многоканальной связи для обеспечения сверхнадежной связи с низкой задержкой (URLLC)	384

Павлов А. С., Фокин Г. А. Основы построения и функционирования корреляционной базы данных в задачах позиционирования методом радиоотпечатков с использованием моделей распространения радиоволн	390
Парамонов А. И., Штырляев Н. А. Управление качеством услуг голографической видеоконференцсвязи путем выбора параметров передачи медиа данных	396
Паращук И. Б., Саяркин Л. А., Цыпнятов В. Б. Многокритериальный выбор предпочтений пользователей на основе явных и неявных экспертных знаний для реализации релевантного информационного поиска на ресурсах инфокоммуникационных систем.	402
Пелин А. А., Савищенко Н. В. Точные аналитические решения расчета вероятности ошибки многопозиционных сигналов при использовании метода обнуления в каналах ММО	408
Перелыгин С. В., Чижиков С. Д., Шитова О. С. Влияние интенсивности излучения светодиодов на задание коррелированной цветовой температуры в художественном освещении	417
Петров П. С. Моделирование остаточной реконструкции рефлектограммы в вычислительной оптической рефлектометрии во временной области для автономного мониторинга волоконных линий связи	422
Прасолов А. А., Свиньина О. А. Универсальный макет для изучения особенностей цифровой обработки звуковых сигналов	428
Рогова М. С., Синильников А. М. Моделирование в среде MATLAB канала спутниковой связи с морскими судами	435
Рютин К. Е., Фокин Г. А., Цап В. В. Разработка и экспериментальная апробация генератора сигналов стандарта LTE	441
Рябиков Д. С. Протокол управления лучами в сетях 5G New Radio	447
Сопов Д. А. Исследование восстановления несущей частоты на основе петли Костаса в программной среде MATLAB	453
Татаренков Д. А. Подготовка специалистов ТВ к работе в высокотехнологичных иммерсивных средах	458
Татаренков Д. А., Федотов Д. Д. О применимости инерциального захвата движений пользователя в системе телеприсутствия	463
Фокин Г. А., Хыя Х. К. Экспериментальная оценка точности измерения разности времен прихода сигналов LTE	469
РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ И РОБОТОТЕХНИКА	475
Авдяков В. А. О проблемах, возникающих в радиолокационных системах, сопровождающих маловысотные летательные аппараты в условиях многолучевого распространения электромагнитных волн	475

Акимов С. В., Верхова Г. В. Архитектура децентрализованных интеллектуальных геоинформационных моделей	482
Барышников Н. В., Вологин С. Г., Путилин А. Н. Техники модуляции в канале декаметровой радиосвязи	448
Белоус К. В., Пиликина Е. А., Попугаев Д. Г., Шабанов А. П. Нормативно-правовое обеспечение применения технологий распределенных реестров в системах управления предприятием	492
Борисов М. Г., Коровин К. О. Расчет рабочих характеристик стационарных СДВ станций на примере радиостанции Cutler	497
Борисов С. В., Ланда А. Э., Остроумова Ю. С., Ханин С. Д., Шумаков П. П. К активизации формирующего ресурса обучения физическим основам электроники	503
Борисов С. В., Ланда А. Э., Остроумова Ю. С., Ханин С. Д., Шумаков П. П. Методы инженерии электронных спектров как средство и предмет обучения физическим основам полупроводниковой электроники сверхвысоких частот и оптического диапазона	509
Владыко А. Г., Плотников П. В., Тамбовцев Г. И. Микросервисная архитектура в V2X-системах	515
Волостных В. А., Воробьев П. В., Ткачев Д. Ф. О динамике активности геомагнитных возмущений за 2022 – 2026 радиогоды	522
Волынкин П. А., Четверухин А. С. Идентификация графических объектов средствами частотных портретов	529
Ву З. Т., Глушанков Е. И., Фам К. К. Исследование алгоритма пространственного разнесения с низкой сложностью на основе нейросетевого предиктора	533
Ву З. Т., Глушанков Е. И., Фам К. . Эффективность применения глубоких нейронных сетей в задачах канального декодирования	539
Гах К. Н., Филатов М. Ю., Шабанов А. П. Разработка программно-алгоритмического обеспечения шлюза для оркестрации микросервисов с поддержкой протоколов gRPC и GraphQL	546
Горобцов И. А. Оценка и методы повышения энергетической эффективности радиолиний	551
Давыдов В. В., Сочнев И. В. Разработка цифрового вычислительного синтезатора с алгоритмом расчета начальной фазы сигналов	557
Данилин Г. В., Денисова А. А., Соколов С. С., Худайназаров Ю. К. Методика вычисления параметров траекторного управления морским автономным надводным судном	565
Зайцева З. В. Разработка и создание виртуального лабораторного практикума по расчету энергетических показателей реактивных фильтров с разными видами фильтрующих функций	568

Закиров И. И., Колосько А. Г., Мицкевич А. А., Попов Е. О., Филиппов С. В. Механизмы формирования эмиссионного изображения в полевом эмиссионном проекторе с плоским люминесцентным экраном	576
Ибрагимов Р. С., Протасеня С. В. Суточный монитор артериального давления	582
Колосько А. Г., Меньшиков Г. К., Харьков Д. А. Лабораторный стенд для изучения свойств элементов микроэлектроники	586
Коробейников А. Н., Ланда А. Э. Топология балансного моста СВЧ-диапазона на основе направленной фильтрующей структуры	592
Коровин К. О., Макаров В. А. Анализ и применение комбинированных методов повышения развязки между каналами в антенной решетке ММО – радара	597
Коровин К. О., Уроков А. Д. Расчет компактной переключаемой антенны связи для БПЛА	604
Кужлев М. Ю., Усс В. С. Разработка дистанционного мониторинга здоровья пациента с модулем предиктивной аналитики	611
Курашев З. В., Лиманцева Е. В., Чуднов А. М. Оценка влияния интенсивности служебного трафика на своевременность доставки сообщений в сети передачи данных с применением ретрансляторов на беспилотных летательных аппаратах	617
Любимов А. Г., Уласик В. В. К вопросу разработки системы автоматизированного управления производствами	625
Макаров Л. М. Имплицитность компьютерных процедур синтеза суждений	630
Мохова А. А. Исследование помехоустойчивости навигационных систем при различных типах помех	636
Остроумова Ю. С., Ханин С. Д. Структурная организация оксидного диэлектрика танталовых и ниобиевых емкостных элементов как фактор обеспечения и ограничения условий их работоспособности	643
Павлов Ф. Ф. Закон смещения Вина в астрофизическом контексте: какой максимум мы наблюдаем?	649
Павлов Ф. Ф., Федюшин В. Б. Влияние неоднородности гравитационного поля Земли на движение математического маятника	654
Сазонов В. В. Распределение и преобразование данных в трактах и каналах системы связи специального назначения	662
Усс В. С., Хоанг В. Т. Повышение помехоустойчивости систем управления беспилотными воздушными судами в задачах транспортной логистики с применением теоретико-игрового подхода	668
Хренов А. А. Синтез когнитивного алгоритма пространственной обработки сигналов в условиях воздействия мерцающих помех на основе теоретико-игрового подхода	674

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПРОГРАММНАЯ ИНЖЕНЕРИЯ	680
Акопьян К. А., Белая Т. И., Бурмистров Н. А., Падерин М. В. Прогнозирование оттока абонентов телекоммуникационного оператора: сравнение логистической регрессии и градиентного бустинга	680
Алексеев А. Б., Дмитриева О. М., Камартина Н. М. Сравнительный анализ различных регрессионных моделей	687
Аль-Нами Б. А., Колпаков Д. И. Дизайн образовательных пособий: влияние цвета на обучающихся и процесс обучения	693
Аль-Нами Б. А., Мосякин Д. С. Дизайн игровых локаций: влияние на погружение, навигацию и игровой опыт	698
Аль-Нами Б. А., Скажутин А. Р. Роль ментальных моделей в UX-дизайне	703
Белая Т. И., Киямов А. О. Сравнительный анализ алгоритмов машинного обучения для раннего выявления прихвата бурильной колонны	708
Березкин А. А., Ченский А. А. Анализ подходов к синхронизации данных в гибридных сетях связи	714
Бирюков М. А., Боровских М. С. Разработка сервиса стандартизированной генерации микросервисов и интеграции в CI/CD-контур	721
Бирюков М. А., Ким З. В. Гибридная модель машинного обучения для обнаружения аномалий сетевого трафика в системах сетевого обнаружения и реагирования	726
Бирюков М. А., Фетюхин И. А. Разработка распределенной системы мониторинга и логирования с интеллектуальным анализом для Java/Spring- приложений	732
Бондаренко И. Б., Матвеев П. В. Влияние на сходимость стратегий изменения скорости обучения трансформеров	738
Бондаренко И. Б., Соловьев Д. М. Цифровой двойник сетевой инфраструктуры промышленного интернета вещей для задач предиктивного обслуживания	742
Бондаренко И. Б., Суслов А. А. Сравнение классических и децентрализованных методов управления светофорами при варьировании плотности спроса	746
Волынкин П. А., Попугаев Д. Г., Стрелец К. М. Концептуальная модель киберфизической системы обнаружения дорожно-транспортных происшествий на основе городского видеонаблюдения	752
Гвоздков И. В., Денисова Ю. В., Кушнир А. Р. Анализ актуальных методов защиты интернет-соединения в условиях эволюции киберугроз	757
Гвоздков И. В., Омаров Э. Г., Перевозник Ю. Я. Модель угроз для платформы распространения пользовательских скриптов и расширения браузера: STRIDE/ATT&CK, риск-ориентированная политика публикации и запуска	764

Горохов Д. Г., Жаранова А. О. Формирование трехуровневой модели профессионального соответствия для задач автоматизированного комплектования проектных команд	770
Губин А. Н., Литвинов В. Л. Прогнозирование автомобильных пробок при пересечении перекрестка	777
Губин А. Н., Литвинов В. Л., Филиппов Ф. В. Методы агрегации эмбедингов для решения задач классификации текстов	782
Давыдов В. В., Прохоров Д. А., Якушева М. А. Композитный индекс сосудистой жесткости на основе биомедицинских сигналов	789
Давыдова Е. В., Мошак Н. Н. Проблемы построения моделей нарушителя и угроз облачных информационных систем	795
Денисова Е. А. Разработка и оценка методов аппроксимации огибающей спектра в задачах обработки электрокардиосигналов сверхвысокого разрешения	801
Денисова Ю. В. Негативные сценарии повсеместного и бесконтрольного использования искусственного интеллекта в разработке ПО	805
Денисова Ю. В., Кушнир А. Р. Предварительная валидация и минимизация ошибок заполнения XML-сообщений при межсистемном обмене в банковских ИС	810
Злобин О. Н., Литвинов В. Л., Филиппов Ф. В. Система оценки и выбора ходов в шахматах на базе архитектуры TRANSFORMER	816
Козлова Л. П., Козлова О. А., Раковский О. В. Возможности применения алгоритмов нечеткой логики в интеллектуальных системах	823
Козлова О. А., Матюхина Т. В., Раковский О. В. Agile-архитектура. Баланс между эволюцией и стабильностью в долгосрочных проектах	828
Костельцева У. А., Неелова О. Л. Реализация взаимодействия BIOS/UEFI с BMC по протоколу IPMI для настройки сетевых параметров	834
Куракин Ф. П., Пачин А. В. Анализ методов для построения цифровых двойников IoT систем	840
Кутев М. А., Левшун Д. С. Разработка системы интеллектуального конспектирования на основе автоматического распознавания речи и языковых моделей	846
Лабковская Р. Я. Автоматизация процессов разметки, профилирования и валидации данных в экосистеме g: методологические аспекты и практические решения	852
Манилов А. Н., Плотников П. В. Геометрический подход к оптимизации размещения машинно-технологических станций с временными ограничениями на доставку	858
Медведев С. А. Минималистичная теория множеств на бескванторной логике	862
Молоков Д. А. Решение задачи регрессии с помощью нейронной сети на основе моделей меметических алгоритмов	869

Степанян Д. А. Разработка платформы автоматизации управления контрактами в микросервисной архитектуре на основе OpenAPI и AsyncAPI	874
Тарасов В. А. Вопросы администрирования корпоративной информационной инфраструктуры	879
Устинов М. В., Шиян А. А. Перспективы импортозамещения операционных систем в государственном секторе Российской Федерации	883
Целоусов Г. А. Моделирование адаптивной системы прогностического обслуживания сетевого оборудования при помощи методов машинного обучения	890
АВТОРЫ СТАТЕЙ	896

ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫЕ СЕТИ И СИСТЕМЫ

УДК 681.327

ГРНТИ 49.33.29

СРАВНЕНИЕ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО И ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ДОСТУПА К СЕТЯМ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ

Н. И. Абрамова, П. В. Воробьев, М. З. Лящук

Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного

В статье сравниваются реализованные в вычислительных сетях способы централизованного и децентрализованного доступа к передаче информации. При этом оба эти способа предполагают управление доступом. Даны аналитические выражения по оценке и сравнению этих способов.

централизованный и децентрализованный доступ, передача информации, устройство управления, цикл передачи, время перехода

Обычно в сетях передачи информации применяются два типа доступа к передаче. В первом варианте пользователь получает доступ через специальный порт (накопитель, концентратор). В сетях коммутации пакетов сообщения пользователей накапливаются, а затем считываются в порядке поступления в соответствующую исходящую линию либо в полученном виде, либо с разбиением на более мелкие пакеты. Этот метод называется статистическим или асинхронным с объединением во времени (мультиплексированием). Существуют более простые методы мультиплексирования, когда каждому пользователю предоставляется соответствующее временное окно в исходящем канале. Другой тип систем доступа предназначен для варианта использования передачи информации от многих пользователей общего канала. При этом возможны два основных способа доступа. Один способ доступа заключается в управлении доступом:

- централизованно (способом «опроса»);
- децентрализованно (способом передачи «метки»).

Другой способ, при котором пользователи стремятся получить доступ к общему каналу по мере необходимости, называется неуправляемым или случайным [1]. В этом способе пользователи не согласуют свои стремления получения доступа, возможны столкновения сообщений, для разрешения которых применяются специальные алгоритмы [2].

Модель централизованного управления доступом представлена на рисунке 1, на котором номерами 1, 2, ..., N-1, N обозначены станции пользователей, ЦУУ – общее центральное управляющее устройство, соединенное с пользователями двумя линиями: одна входящая для передачи управления, а другая, исходящая, для передачи сообщений с ЦУУ.

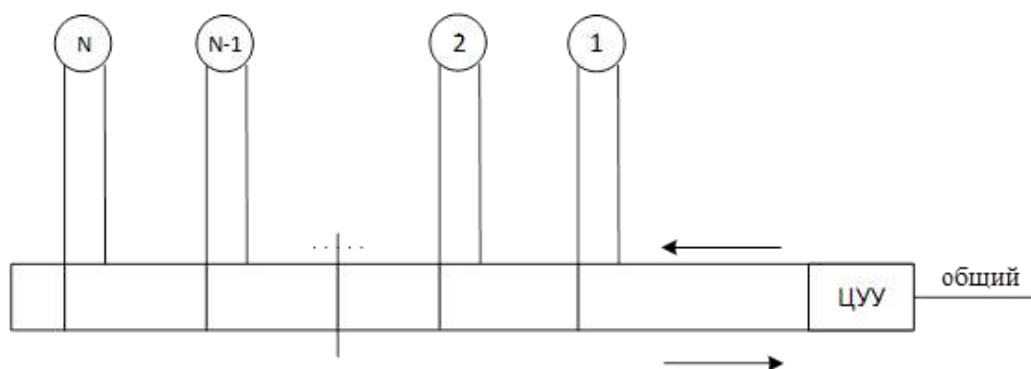


Рис.1. Модель централизованного управления доступом

Способ централизованного управления заключается в последовательном опросе пользователей на наличие у них сообщений на передачу. Станция, получившая разрешение на передачу, пересылает сообщение в ЦУУ по исходящей линии и завершает передачу уведомлением о её завершении. ЦУУ после этого посылает сигнал опроса следующей по списку станции, которая повторяет процедуру передачи, а станция, не имеющая сообщений на передачу, уведомляет об этом ЦУУ. После прохождения опроса всего списка станций цикл управления завершается и начинается в том же порядке новый.

Основным параметром, по которому определяется качество управления доступом, является временная задержка доступа, которая измеряется интервалом времени между моментами поступления пакета в станцию пользователя и его передачи в общий канал. Общая структура опроса станций пользователей показана на рисунке 2, где w_i – время перехода опроса от одной станции к другой, t_i – время передачи сообщения (накопленных пакетов).

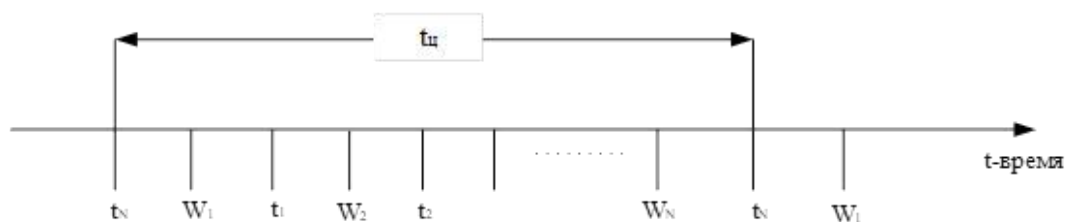


Рис. 2. Общая структура опроса пользователей

Среднее время опроса всех пользователей равно

$$t_{\text{ц}} = \sum_{i=1}^N w_i + \sum_{i=1}^N t_i = t_0 + \sum_{i=1}^N t_i,$$

где w_i и t_i – средние значения времени i -го перехода и i -ой передачи, t_0 – время суммарное переходов.

Количество пакетов, накопившееся у пользователя за время цикла равно $\lambda_i t_{\text{ц}}$, где λ_i – интенсивность нагрузки i -ой станции. При интенсивности обслуживания μ_i среднее время передачи t_i равно

$$t_i = \frac{\lambda_i}{\mu_i} t_{\text{ц}} = \rho_i t_{\text{ц}}.$$

Подставляя полученное выражение в формулу для $t_{\text{ц}}$ получим

$$t_{\text{ц}} = \frac{t_0}{1-\rho},$$

где $\rho = \sum_{i=1}^N \rho_i$ – общая нагрузка на канал передачи. При равенстве нагрузки станций и пуассоновском обслуживании среднее время задержки $Z(T)$ равно

$$Z(T) = \frac{t_{\text{ц}}}{2} \left(1 - \frac{\rho}{N}\right) + \frac{1}{\mu} \cdot \frac{\rho}{1-\rho} \text{ при } \rho_i = \frac{\rho}{N}$$

При малом уровне общей нагрузки ρ время задержки определяется половиной времени цикла опроса, т.е. временными затратами на управление. При увеличении нагрузки начинает увеличиваться задержка, связанная с передачей сообщений, при $\rho \rightarrow 1$ определяющее значение имеет этот процесс.

Значительные затраты времени на централизованное управление, играющие основную роль в задержке доступа, могут быть уменьшены за счет перехода к децентрализованному управлению – опросу с передачей управления (передачей метки). При децентрализованном управлении цикл начинается с опроса удаленной N -ой станции, которая, получив от ЦУУ разрешение на передачу, по завершении её, включает в своё исходящее сообщение адрес следующей $N-1$ станции. Последняя, распознав в этом исходящем сообщении свой адрес, передает свое исходящее сообщение с добавлением адреса $N-2$ станции и т.д. Процесс заканчивается на станции номер 1, которая включает в свое сообщение адрес ЦУУ, после чего цикл начинается снова.

Сравнение децентрализованного и централизованного управления показывает, что основное отличие заключается во временных затратах на управление. При централизованном управлении время перехода t_o равно

$$t_o = N \cdot t_y + N \cdot t_s + \tau',$$

где t_y – длительность опрашивающего сообщения;

t_s – время синхронизации;

τ' – среднее время задержки за счет распространения сигнала по линии управления при опросе всех станций, равное $\frac{\tau}{2}(1+N)$, где τ – круговая задержка сигнала опроса, соответствующая расстоянию между ЦУУ и N -ой станцией.

При децентрализованном управлении время передачи t_o уменьшится за счет уменьшения времени распространения сигнала, а также за счет отсутствия специального опрашивающего сигнала, поскольку адрес следующей станции включается в информационное сообщение, передаваемое по исходящей линии. Следовательно, при опросе с передачей управления

$$t_o = \tau + N \cdot t_s,$$

очевидно, что переход от централизованного управления к децентрализованному дает значительный выигрыш по времени доступа для протяженных сетей.

Список используемых источников

1. Сетевые протоколы и управление в распределенных вычислительных сетях. М.: Наука, 1986. 220 с., с. 45-64.
2. Мамзелев И. А. Вычислительные системы в технике связи. М.: Радио и связь, 1987. 240 с., с. 111-116.

COMPARISON OF CENTRALIZED AND DECENTRALIZED ACCESS TO INFORMATION TRANSMISSION NETWORKS

Abramova N., Vorobyev P., Lyashuk M.

Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union
S. M. Budyonny

This article compares centralized and decentralized access methods for information transfer implemented in computer networks. Both methods involve access control. Analytical expressions for evaluating and comparing these methods are provided.

Key words: *centralized and decentralized access, information transmission, control device, transmission cycle, transition time*

УДК 654.09
ГРНТИ 49.33.01

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ СЕТЕЙ, ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ КО ВРЕМЕНИ, НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

А. И. Алексеев, А. К. Канаев

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I

Технология сетей, чувствительных ко времени (Time-Sensitive Networking), представляет широкий набор механизмов управления трафиком в сетях Ethernet и позволяет обеспечить своевременную и достоверную доставку критически важной информации. Это делает актуальным вопрос о возможности и целесообразности применения сетей, чувствительных ко времени, для организации связи в различных сферах. В настоящем докладе рассматриваются перспективы и направления использования данной технологии в сетях связи железнодорожного транспорта.

сети Ethernet, TSN, связь на железнодорожном транспорте

Технологические сети связи железнодорожного транспорта являются критически важной системой, обеспечивающей бесперебойный обмен информацией, который необходим для поддержания непрерывного и безопасного перевозочного процесса. По этой причине ключевыми требованиями к работе данных сетей являются достоверность доставки и высокая надежность функционирования. В настоящее время магистральные сети железнодорожной связи строятся главным образом на базе технологии синхронной цифровой иерархии, что, в свою очередь, обуславливает следующие их основные особенности [1, 2]:

- ориентированность на передачу речевого трафика в реальном времени;
- относительно небольшие скорости магистральных потоков;
- фиксированная пропускная способность, выделяемая на один основной цифровой канал;
- низкие и предсказуемые задержки передачи.

Эти характерные черты систем СЦИ на момент их внедрения на железных дорогах вполне соответствовали требованиям технологической сети. На сегодняшний день они также остаются ее основой и в целом удовлетворяют многие потребности ОАО «РЖД» по организации связи. Цифровые каналы 64 кбит/с как наименьшие элементы потока, выделяемые пользователям, хорошо подходят для важнейших видов связи, являющихся телефонными – оперативно-технологической (ОТС) и обще-технологической (ОБТС) [2]. Кроме того, применение коммутации каналов гарантирует ма-

лые значения для задержек передачи и их вариации, что согласуется с повышенными требованиями к своевременности доставки информации. Жесткое распределение канальных интервалов и синхронизация узлов сети обеспечивают высокую надежность ее работы.

Вместе с тем, названные особенности нельзя назвать однозначными достоинствами систем СЦИ. Так, фиксированная и весьма малая скорость передачи ОЦК затрудняет масштабирование пропускной способности сети для передачи информации большого объема и иного рода, чем телефонный трафик. В частности, для передачи трафика данных в сетях СЦИ требуется применение механизмов NGN SDH, включающих в себя дополнительные процедуры по логическому объединению стандартных каналов в один [3]. Резервирование для пары абонентов части пропускной способности сети на весь сеанс связи, характерное для канальной коммутации, неэффективно в силу того, что передача редко ведется непрерывно (в частности, в случае телефонного разговора, на который ориентированы СЦИ, до 60 % времени могут составлять паузы [2]), и занятый канал бездействует [2, 4]. Скорости наиболее широко используемых потоков СЦИ уровня STM-1 и STM-4 (155 и 620 Мбит/с соответственно) достаточны для агрегации речевого трафика технологической сети, но в современных условиях довольно малы сами по себе. Однако каждый такой поток требует выделения весьма значительных ресурсов физической сетевой инфраструктуры (оптоволоконной пары или спектрального канала WDM), что также представляется малоэффективным с точки зрения эксплуатации пропускной способности.

Перечисленные недостатки систем СЦИ и коммутации каналов в целом в значительной мере отсутствуют в сетях с коммутацией пакетов, в настоящее время широко распространенных и используемых для доставки самого разнообразного трафика. ОАО «РЖД» также имеет в эксплуатации собственные сети пакетной передачи, базирующиеся на стеке протоколов TCP/IP, в том числе высокоскоростную технологическую сеть передачи данных (ВСТСПД) [5]. Тем не менее, весомые недостатки данных сетей – возможность значительных задержек пакетов, их непредсказуемость и большая вариация, вероятность потери отдельных пакетов [4] – не позволяют широко применять пакетную коммутацию для организации ответственных видов технологической связи.

На канальном уровне основой построения проводных пакетных сетей является технология Ethernet, которая в своем классическом варианте также не предполагает особых гарантий доставки кадров конечному получателю. Вместе с тем, в настоящее время активно разрабатывается расширение Ethernet, направленное на устранение его недостатков в части задержек и надежности – технология сетей, чувствительных ко времени (Time-Sensitive Networking –

TSN). Она регламентируется стандартом IEEE 802.1Q-2022 и поправками к нему и включает в себя четыре основных элемента [6]:

1. Синхронизация по времени;
2. Ограниченная низкая задержка;
3. Высокая надежность;
4. Управление ресурсами.

Кроме этого, в рамках стандарта также разрабатываются профили, определяющие применение инструментов TSN в сетях различного назначения. В совокупности технология сетей, чувствительных ко времени, предлагает широкий набор механизмов для приоритизации трафика и управления им, формирования потока кадров с учетом требований к задержкам различных классов пользователей, дублирования кадров с пересылкой по независимым маршрутам. Это позволяет использовать сети Ethernet для организации работы критически важных приложений и приложений реального времени, чувствительных к задержкам передачи и потерям кадров.

В контексте технологической связи на железнодорожном транспорте технология TSN также может быть интересна, потому что предлагаемые в рамках нее решения направлены на обеспечение гарантий своевременной и достоверной доставки информации. Таким образом, назначение данной технологии хорошо согласуется с ключевыми требованиями к железнодорожной связи и потенциально способно устранить те недостатки пакетной коммутации, которые ограничивают ее применение в технологических сетях. На рис. 1 представлена возможная схема использования устройств TSN в составе СПД железнодорожной технологической связи.

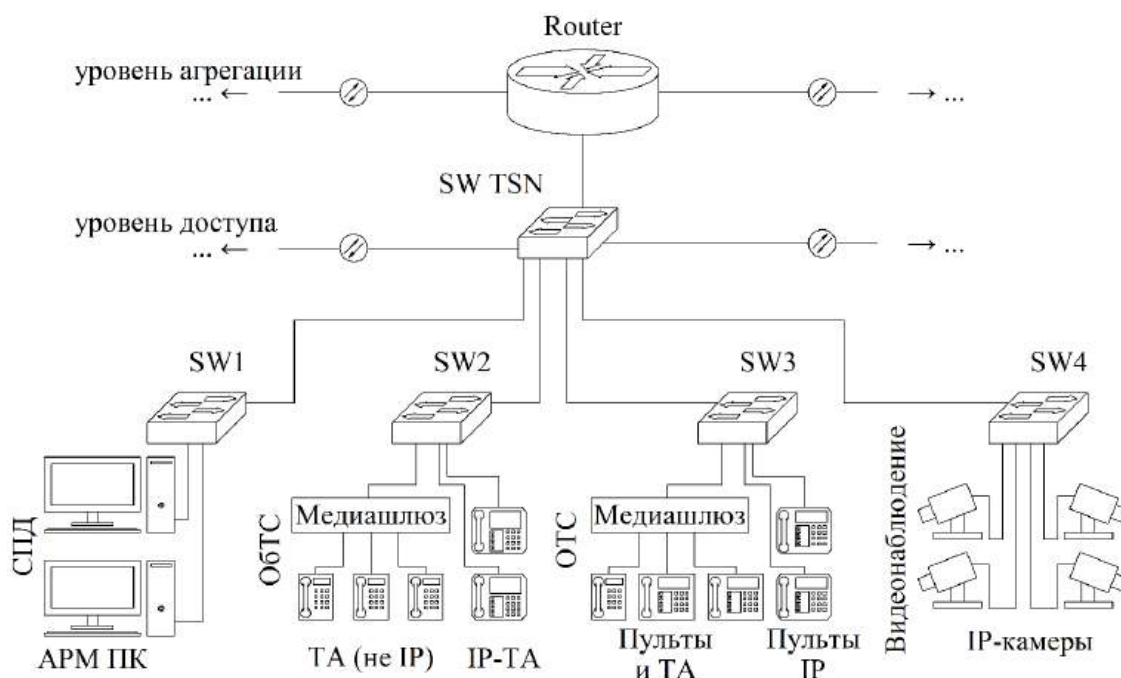


Рис. 1. Возможная схема построения СПД ОАО «РЖД» на базе технологии TSN

Предлагаемая сеть может позволить передавать разнообразный трафик технологической связи на базе единой сетевой инфраструктуры, использующей технологии стека TCP/IP. Использование устройств с поддержкой TSN (SW TSN) для построения нижних уровней сети, в свою очередь, позволит осуществлять управление трафиком в соответствии с его приоритетом и требованиями к временным задержкам. Так, для потоков наиболее критичного трафика возможна пересылка кадров, при которой практически исключается нахождение в очередях, и итоговая сквозная задержка будет сопоставима с таковой для систем с коммутацией каналов. Таким образом, механизмы резервирования и средства формирования трафика, предусмотренные TSN, позволят эффективно эксплуатировать ресурсы сети (прежде всего, дорогостоящую линейную инфраструктуру) с сохранением заданных параметров качества обслуживания для всех категорий пользователей. Это дает возможность без опасений агрегировать потоки трафика различного рода, в том числе чувствительного к задержкам: трафик данных от автоматизированных рабочих мест (АРМ ПК); речевой трафик от телефонных аппаратов (ТА) и пультов технологической связи (напрямую для устройств IP-телефонии или посредством медиашлюзов – для остальных); трафик от камер видеонаблюдения.

Следует отметить, что железнодорожную сеть связи нельзя назвать строго системой реального времени: с учетом распределенного характера сети и того, что наиболее важные виды связи относятся к телефонии, требования к задержкам передачи по порядку величины в таких случаях определяются скоростью реакции абонентов, и более важной становится не абсолютная величина задержек, а их вариация для обеспечения комфортного разговора без перерывов. Поэтому вопрос о достаточности для нужд технологической сети простой приоритетной передачи кадров или же необходимости применения механизмов TSN, минимизирующих сквозные задержки, требует дополнительного изучения.

Однако есть и другая область для возможного применения технологии TSN: бортовые сети подвижного состава, в том числе беспилотного. В отличие от вышеназванного случая технологических сетей, бортовая сеть, напротив, является системой реального времени, сконцентрированной в пространстве (что обуславливает малые задержки распространения и, соответственно, увеличивает вклад задержек в узлах коммутации) и передающей трафик между большим количеством устройств контроля и управления, функционирующих в автоматическом режиме (что требует достижения за-

держек, по порядку величины сопоставимых с временем или циклом срабатывания устройств). В этом случае применение механизмов по обеспечению гарантированных низких задержек будет оправданным и необходимым. Подобное использование устройств TSN описано, например, в [7], где рассматривается построение бортовой сети поезда, включающей несколько подсистем, каждая из которых передает данные различной степени критичности, и показана эффективность применения этой технологии для управления трафиком сети.

В заключение в таблице 1 в сравнительной форме представлены характеристики каждого из рассмотренных перспективных направлений использования сетей TSN для организации связи на железных дорогах.

ТАБЛИЦА 1. Особенности возможных направлений для использования сетей TSN на железнодорожном транспорте

Характеристика	Направление использования технологии TSN	
	Технологическая сеть	Бортовые сети
Роль технологии TSN	Обеспечение QoS, оптимизация использования сетевых ресурсов	Обеспечение функционирования автоматизированных систем реального времени
Характер сети с т.з. расположения в пространстве	Распределенная	Локализованная
Типовые оконечные устройства сети	Абонентские терминалы телефонии, персональные компьютеры, видеокамеры	Автоматизированные устройства управления, датчики, видеокамеры
Порядок величины допустимых задержек передачи	Время реакции абонента (~ 100 мс – 1 с)	Время/период срабатывания устройств (~ ≤ 1–10 мкс)

Список используемых источников

1. Шмытинский В. В., Глушко В. П., Казанский Н. А. Многоканальная связь на железнодорожном транспорте. Учебник для вузов ж.-д. транспорта. / Под ред. Шмытинского В. В. М.: ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2008. 704 с.

2. Лебединский А. К., Павловский А. А., Юркин Ю. В. Автоматическая телефонная связь на железнодорожном транспорте: Учебник для вузов ж.-д. транспорта / Под ред. А.К. Лебединского. М.: ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2008. 531 с.

3. José M. Caballero. SONET/SDH and NG-SONET/SDH, 2005. Reprinted with corrections: 28 October 2015. ISBN 84-609-4420-4.

4. Кудряшов В. А., Павловский Е. А. Передача дискретных сообщений на железнодорожном транспорте: учеб. пособие. М.: ФГУ ДПО «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2017. 319 с. ISBN 978-5-89035-967-4.

5. Сеть цифрового ландшафта // Вестник цифровой трансформации РЖД, Выпуск №1 от 03.04.2021. URL: <https://gudok.ru/vestnik-ct/?ID=1559001> (дата обращения: 10.05.2026).

6. Time-Sensitive Networking (TSN) Task Group. URL: <https://1.ieee802.org/tsn/> (дата обращения: 10.05.2026).

7. Feng Bao, Haoyang Yu, and Hao Wang. TSN-Based Backbone Network of Train Control Management System // Wireless Communications and Mobile Computing, Volume 2022, Article ID 5789444, 12 pp.

PROSPECTIVE AREAS OF USING TIME-SENSITIVE NETWORKING TECHNOLOGY ON THE RAILWAYS

Alekseev A., Kanaev A.

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University

Time-Sensitive Networking technology provides a wide range of traffic management mechanisms in Ethernet networks and allows for timely and reliable delivery of critical information. This makes the issue of the possibility and expediency of using time-sensitive networks for communication in various fields relevant. This paper examines the prospects and areas of using this technology in railway communication networks.

Key words: Ethernet Networks, Time-Sensitive Networking, railway communications

УДК 621.39, 530.182

ГРНТИ 49.29.14

ПРИМЕНЕНИЕ БРИЛЛЮЭНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ В УСТРОЙСТВАХ ФОТОНИКИ

Е. И. Андреева, О. Д. Нестеров

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Преимущества волоконно-оптических линий связи наиболее полно реализуются в длиннопролетных высокоскоростных проектах. Базовая характеристика таких систем – производительность, определяемая как произведение скорости передачи данных на длину пролета. Реализация таких проектов предъявляет особые требования к компонентам системы. Так, при выборе источника символьных импульсов необходимо контролировать не только ширину спектра лазера, но и частотную модуляцию (чирп). Допустимая входная мощность символьных импульсов зависит от нелинейных параметров волоконного световода. Для оптимизации параметров ВОЛС могут использоваться методы, основанные на бриллюэновском рассеянии. В ходе экспериментального исследования изучены режимы спонтанного и вынужденного бриллюэновского рассеяния сверхкоротких оптических импульсов в волоконном световоде.

волоконно-оптические сети, волоконный световод, рассеяние Мандельштама-Бриллюэна, рэлеевское рассеяние, рамановское рассеяние, мониторинг волоконно-оптических линий связи, нелинейные эффекты в волоконных световодах, нелинейный показатель преломления

Для поддержания оптической кабельной системы в рабочем состоянии в течение всего срока эксплуатации необходимо убедиться в соответствии условий тем, которые указаны в спецификации производителя [1-12]. Основные факторы, которые влияют на рабочие характеристики волоконных световодов, представляющих собой физическую среду передачи информации, можно подразделить на и техногенные. К природным факторам относятся сезонные смещения грунта, размывы почвы в случае подземной прокладки оптического кабеля, ветровые нагрузки, налипание гололеда, радиационное влияние и молнии в случае подвеса оптического кабеля на опорах. К техногенным факторам относятся аварии на теплосетях выбросы агрессивных веществ, изменение радиационного фона и т.п.

Волоконно-оптические линейные тракты характеризуются большой протяженностью. Это обстоятельство обуславливает необходимость ди-

станционного мониторинга состояния волоконного световода в составе оптического кабеля.

Обычные системы мониторинга, функционирующие по принципу OTDR, дают информацию о качестве монтажа оптической кабельной системы, энергетических потерях в тракте. Для выявления факторов, которые могут оказать влияние на изменение рабочих параметров оптической кабельной системы используются нелинейные эффекты, такие, как: рассеяние Мандельштама-Бриллюэна и рассеяние Рамана.

Рефлектометры, работающие на эффекте бриллюэновского рассеяния, дают информацию о механическом напряжении отдельных сегментов волоконного световода, которые могут привести к преждевременному старению волоконного световода. Кроме того, на бриллюэновском рассеянии основан принцип измерения температуры вдоль трассы прокладки оптической кабельной системы. Это особенно важно, когда трасса прокладки оптического кабеля проходит вблизи трубопроводов, промышленных предприятий, теплотрасс и т.п.

Бриллюэновские рефлектометры работают на принципе изменения частоты сигнала обратного рассеяния. Изменение величины частотного сдвига df_a при упругом воздействии на волоконный световод, вызванного механической деформацией ε :

$$K_\varepsilon = \frac{df_a}{d\varepsilon} = \frac{2}{\lambda_{\text{нак}}} \left(V_a \cdot \frac{d}{d\varepsilon} n + n \cdot \frac{d}{d\varepsilon} V_a \right),$$

где $\lambda_{\text{нак}}$ – длина волны накачки, V_a – скорость акустической волны в волокне, n – показатель преломления волоконного световода.

При спонтанном рассеянии Мандельштама-Бриллюэна частоты обеих рассеянных волн (стоксовой и антистоксовой) отличаются от частоты излучения накачки на величину частоты акустической волны f_a .

Изменение частоты акустической волны, порождаемое распространением оптического сигнала, обусловлено ее зависимостью от температуры оптического волокна. Соответствующие коэффициенты, определяющие зависимость сдвига частоты акустической волны от температуры (K_T), определяются выражениями:

$$K_\varepsilon = \frac{df_a}{d\varepsilon} = \frac{2}{\lambda_{\text{нак}}} \left(V_a \cdot \frac{d}{d\varepsilon} n + n \cdot \frac{d}{d\varepsilon} V_a \right),$$

где $\lambda_{\text{нак}}$ – длина волны накачки, V_a – скорость акустической волны в волокне, n – показатель преломления волоконного световода.

Таким образом метод бриллюэновской рефлектометрии позволяет диагностировать влияние внешних воздействий в реальном масштабе времени.

Экспериментальное исследование бриллюэновского рассеяния в одномодовом волоконном световоде проводилось с использованием стандартного телекоммуникационного оборудования для DWDM-систем отечественного производства. Макет экспериментальной установки включал лазер, работающий на частоте из сетки DWDM-систем, эрбиевый усилитель, одномодовый волоконный световод длиной 50 км, анализатор оптического спектра. В ходе экспериментального исследования показано, что порог проявления бриллюэновского рассеяния в одномодовом волоконном световоде достаточно низкий, около 5 мВт. Частотный сдвиг длины волны бриллюэновского рассеяния зависит от типа волоконного световода. Экспериментально зафиксированы спектры сигналов, соответствующие режимам спонтанного и вынужденного бриллюэновского рассеяния.

Таким образом подтверждена возможность диагностики волоконно-оптического тракта методом оптической бриллюэновской рефлектометрии с использованием стандартного телекоммуникационного оборудования отечественного производства.

Следовательно, использование метода бриллюэновской рефлектометрии перспективно для получения распределения натяжения и температуры вдоль волокна при сравнительно невысоком уровне мощности оптического излучения.

Список используемых источников

1. Агравал Г. П. Нелинейная волоконная оптика. М.: Мир. 1996.
2. Кившарь Ю. С., Агравал Г. П. Оптические солитоны. От волоконных световодов до фотонных кристаллов. М.: Физматлит, 2005.
3. Andreeva E. I., Andreev D. P., Method for optimizing fiber optic interferometer for quantum systems // St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 2025. Vol. 18. Iss. 3.2. PP. 125–128. DOI: 10.18721/JPM.183.224.
4. Andreeva E. I., Saltykov N. A., Influence of the nonlinear effects on the high bit rate fiber-optics communication system // St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 2025. Vol. 18. Iss. 3.2. PP. 210–213. DOI: 10.18721/JPM.183.242.
5. Mollenauer L., Gordon G. Solitons in optical fibers // Academic Press, San Diego, USA, 2006. 296 p.
6. Ferreira M. F. S. Nonlinear Effects in Optical Fibers // Hoboken: John Wiley & Sons; Washington: Optical Society of America, 2011. 374 p.
7. Andreev D. P., Nesterov O. D., Andreeva E. I. Monitoring optical fiber parameters using stimulated Brillouin scattering International Conference Laser Optics, ICLO 2024-Proceedings, 2024, P. 315.

8. Mollenauer L. F. Solitons in Optical Fibers: Fundamentals and Applications / L. F. Mollenauer, J. P. Gordon // San Diego: Academic Press, 2006. 296 p.
9. Андреева Е. И., Андреев Д. П., Орлов М. А. Исследование возможности создания широкополосного измерительного источника с использованием нелинейных свойств оптического волокна // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. Т. 17. № 3.1 2024. С. 252–256.
10. Листвин А. В., Листвин В. Н., Швырков Д. В. Оптические волокна для линий связи. Лесаргт, 2003. 288 с.
11. Листвин В. Н., Трещиков В. Н. DWDM-системы. Москва: Техносфера. 2017. 352 с.
12. Слепов Н. Н. Волоконно-оптическая техника: Современное состояние новые перспективы // Сб. статей под ред. Дмитриева С. А., Слепова Н. Н. М.: Техносфера, 2010. 608 с.

APPLICATION OF BRILLOUIN SCATTERING IN THE PHOTONICS DEVICES

Andreeva E., Nesterov O.

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

The advantages of fiber-optic communication lines are most fully realized in long-haul high-speed projects. The basic characteristic of such systems is the performance, which is defined as the product of the data transfer rate and the length of the span. The implementation of such projects imposes special requirements on the system components. For example, when selecting a source of symbol pulses, it is necessary to control not only the laser spectrum width, but also the frequency modulation (chirp). The permissible input power of symbol pulses depends on the nonlinear parameters of the fiber optic cable. Methods based on Brillouin scattering can be used to optimize the parameters of fiber-optic communication systems. In this study, the spontaneous and stimulated Brillouin scattering of ultra-short optical pulses in a fiber optic cable was experimentally investigated.

Key words: fiber-optic communication systems, Brillouin scattering, Rayleigh scattering, Raman scattering, monitoring of fiber-optic communication lines, nonlinear effects in the optics fibers

УДК 621.396
ГРНТИ 49.43

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ОБСТАНОВКА В ПОЛОСАХ ЧАСТОТ СОВМЕСТНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАДИОВЕЩАТЕЛЬНОЙ СПУТНИКОВОЙ СЛУЖБЫ И СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ СВЯЗИ

Б. М. Антипин, Е. М. Виноградов

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Описание электромагнитной обстановки (ЭМО), в которой работают радиоэлектронные средства, является важным шагом в решении практических задач, начиная от расчета радиотрасс и кончая анализом электромагнитной совместимости радиосредств, работающих в полосах частот совместного использования. Развитие радиовещательной спутниковой службы и современных систем связи, использующих общие полосы частот, требует уделить внимание этому вопросу, в частности, для анализа электромагнитной совместимости этих радиосредств. В зависимости от формы описания ЭМО, создаваемой окружением приемной аппаратуры радиовещательной спутниковой службы, и информации о полезном сигнале используются разные способы оценки качества принимаемого полезного сигнала. В работе обсуждаются сценарии возможных конфликтных, с точки зрения обеспечения электромагнитной совместимости ситуаций, которые могут возникнуть между указанными радиосредствами.

электромагнитная обстановка, радиовещательная спутниковая служба, современные системы связи, уровень сигналов, радиочастотный спектр

Введение

Важным шагом в решении практических задач, начиная от расчета радиотрасс и кончая анализом электромагнитной совместимости (ЭМС) радиосредств, работающих в полосах частот совместного использования, является описание электромагнитной обстановки (ЭМО). Согласно [1] «Электромагнитная обстановка – совокупность электромагнитных явлений, процессов в заданной области пространства, частотном и временном диапазонах». Для определения ЭМО, в первую очередь, необходимо определиться с полосами частот, в которых совместно функционируют средства радиосвязи, относящиеся как к спутниковой радиовещательной службе, так и к наземным радиослужбам, а также выяснить возможные значения характеристик радиоизлучений этих средств, влияющих на электромагнитную совместимость.

Радиоэлектронные средства, создающие ЭМО

На рис. 1 показаны основные элементы, входящие в состав радиовещательной спутниковой службы, их взаимодействие и частотные диапазоны. Из рисунка видно, что сигналы земной вещательной станции передаются на космический аппарат, который ретранслирует их на Землю, в частности, для непосредственного приема населением.

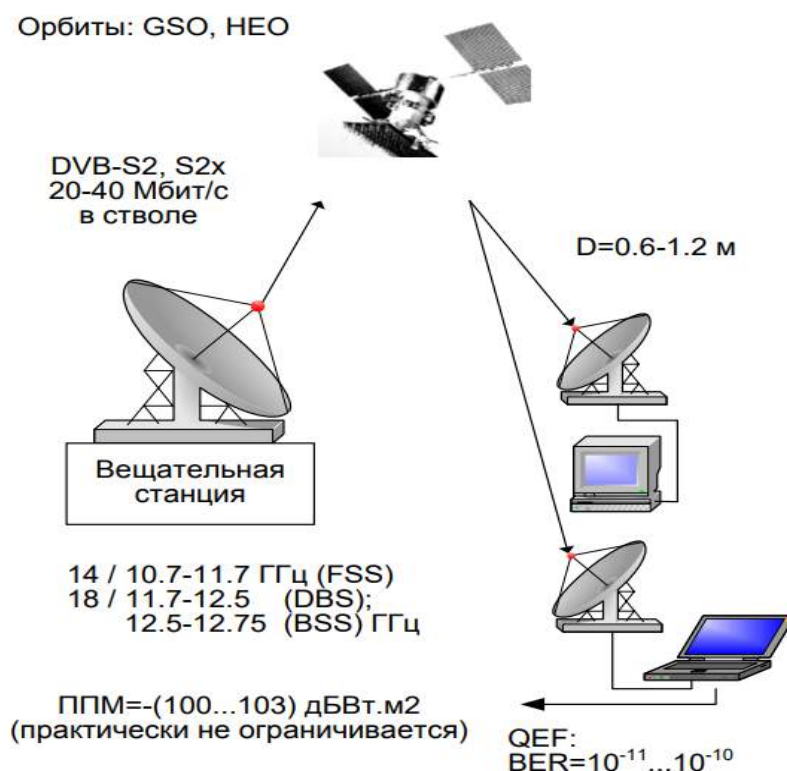


Рис. 1. Элементы и их взаимодействие в составе радиовещательной спутниковой службы, где GSO – геостационарная спутниковая орбита; HEO – эллиптическая орбита; DVB-S – спутниковое цифровое телевидение; FSS – фиксированная спутниковая служба; BSS – цифровое спутниковое вещание; ППМ – плотность потока мощности; D – диаметр зеркала антенны; QEF – квазибезошибочный (о детекторе кода Рида – Соломона)

Работа систем радиовещательной спутниковой службы происходит в окружении наземных радиосредств. Это приводит к тому, что при анализе ЭМС необходимо рассматривать четыре ситуации, в которых возможно возникновение взаимных помех и которые реагируют на определенную часть общей ЭМО:

1. Радиопередатчики (РПД) наземной радиослужбы создают помехи работе земных радиоприемных устройств (РПУ) радиовещательной спутниковой службы (РВСС).

2. РПД наземной радиослужбы создают помехи работе РПУ космического аппарата (КА).

3. РПД КА создает помехи работе РПУ наземной радиослужбы.

4. Земной РПД космической радиослужбы создает помехи работе РПУ наземной радиослужбы.

Общая ЭМО в месте расположения приемных антенн формируется основными и/или неосновными излучениями соответствующих РПД. Числовое значение параметров, которыми она характеризуется (плотность потока мощности, мощность), зависит от частоты и мощности РПД и от расстояния между РПД и РПУ. Размерность параметров, используемых для описания ЭМО, зависит от размерности параметров, которые используются для описания приемных антенн (эффективная площадь апертуры антенны, коэффициент усиления антенны). Качество полезного сигнала, принимаемого в описанной ЭМО, в конечном счете, определяется параметрами РПУ, в частности, его восприимчивостью к внешним помехам и видом модуляции полезного сигнала. Для аналоговых сигналов в качестве критерия чаще всего используют защитное отношение, для цифровых сигналов – значение битовой ошибки, BER.

Таким образом, в рассматриваемой ситуации электромагнитную обстановку в совместной полосе частот создают радиоэлектронные средства спутниковых систем, земных станции и средства радиосвязи фиксированной и подвижной служб. Именно их характеристики, в первую очередь местоположение и уровни излучений передатчиков, будут определять электромагнитную обстановку в указанной полосе частот.

Требования к характеристикам излучений передатчиков

Решением Государственной комиссии по радиочастотам при Минкомсвязи России от 19 декабря 2012 г. № 12-16-09-4 [2] выделены для использования земными станциями спутниковой связи, работающими в сетях радиовещательной спутниковой службы на территории Российской Федерации через бортовые ретрансляторы космических аппаратов на геостационарной орбите полосы частот 17300-18100 МГц (Земля-космос) и 11700-12500 МГц (космос-Земля). Решением ГКРЧ, принятым 4 июля 2022 г. (протокол № 22-63) [2, 3] указанное решение продлено до 19.12.2032 г.

В настоящее время в России, помимо прямого вещания на население, используется фиксированная спутниковая служба с распределением сиг-

нала через наземные сети. Поэтому основные российские спутники («Экспресс», «Ямал») работают в диапазонах С (4/6 ГГц) и Ku (11/14 ГГц).

В разделе 1 Регламента радиосвязи [4], определяющем требования к местоположению передающих наземных и земных станций, работающих в полосах частот, используемых совместно на равных правах с наземными и космическими службами радиосвязи, указано, что местоположения и частоты должны выбираться с учетом соответствующих Рекомендаций МСЭ-Р в отношении географического разнеса между земными и наземными станциями. А именно, местоположения передающих станций, максимальные эквивалентные изотропно излучаемые мощности которых превышают значения 45 дБВт в полосе частот 10-15 ГГц, должны по мере возможности выбираться так, чтобы направление максимального излучения любой антенны отстояло по крайней мере на 1,5 градуса от направления на геостационарную спутниковую орбиту с учетом влияния атмосферной рефракции.

Там же в разделе 2 указано, что эквивалентная изотропно излучаемая мощность земной станции в любом направлении к горизонту не должна превышать +40 дБВт в любой полосе шириной 4 кГц при $0 < \theta < 5^\circ$, где θ – угол места горизонта, наблюдаемый из центра излучения антенны земной станции. Мощность, подводимая передатчиком к антенне станции фиксированной или подвижной службы, не должна превышать +13 дБВт в полосах частот между 1 и 10 ГГц или +10 дБВт в полосах частот выше 10 ГГц.

В Разделе 5 вводятся ограничения на плотность потока мощности, создаваемого у поверхности Земли излучениями космической станции, включая излучения от отражающего спутника. В любых условиях и при любых методах модуляции они не должны превышать предел, приведенный в таблице 1.

ТАБЛИЦА 1. Предельные значения плотности потока мощности излучений космических станций

Полоса частот	Служба радиосвязи	Предел, в дБ (Вт/м ²), при угле прихода (δ) относительно горизонтальной плоскости			Эталонная ширина полосы частот
		0-5°	5-25°	25-90°	
11,7–12,5 ГГц (Район 1)	Фиксированная спутниковая служба (космос-Земля) (негеостационарная орбита)	-124	-124+0,5(δ -5)	-114	1 МГц

Что касается средств радиосвязи, работающих в совместной полосе частот с радиовещательной спутниковой службой и относящихся к фиксированной радиослужбе, то, в первую очередь, следует обратить внимание на радиорелейные станции. Излучения этих станций будут, очевидно, участвовать в формировании ЭМО. В связи с этим, приведем основные требования к характеристикам современных цифровых и аналоговых радиорелейных линий, которые даны в [5]. В таблице 2 представлены некоторые из них.

ТАБЛИЦА 2. Требования к основным техническим характеристикам радиорелейных систем прямой видимости

Наименование параметра	Значение параметра
Полоса радиочастот	10,7-11,7 ГГц
Тип РРС	Цифровая, Аналоговая
Величина дуплексного разноса	530 МГц
Максимальная мощность передатчика РРС, не более	1,0 Вт
Относительная нестабильность частоты передатчика	В соответствии с нормами ГКРЧ 17-21
Относительный уровень побочных излучений передатчика	В соответствии с нормами ГКРЧ 18-21
Ширина полосы излучения и внеполосные излучения передатчика РРС	В соответствии с нормами ГКРЧ 19-21
Чувствительность приемника РРС, не хуже, дБм	-58,5
Относительная нестабильность частоты гетеродина приемника РРС, не хуже	20×10^{-6}
Избирательность приемника по соседнему каналу, не хуже, дБ	45
Избирательность приемника по зеркальному каналу, не хуже, дБ	60
Ширина диаграммы направленности антенны в горизонтальной плоскости, не более, град.	4,5

Заключение

Определены радиоэлектронные средства, создающие электромагнитную обстановку в полосе частот совместного использования с радиовещательной спутниковой службы.

Приведены требования к параметрам излучений данных средств, сформулированные в нормативных документах.

Полученные результаты могут служить основой для оценки электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств в ЭМО, формируемой в полосах частот совместного использования радиовещательной спутниковой службой и современными средствами радиосвязи.

Список используемых источников

1. ГОСТ 30372-95/ГОСТ Р 50397-92. Межгосударственный стандарт. Совместимость технических средств электромагнитная. Термины и определения. М.: ИПК Издательство стандартов, 2001.
2. Решение Государственной комиссии по радиочастотам при Минкомсвязи России от 19 декабря 2012 г., протокол № 12-16-09-4 “Об использовании полос радиочастот в диапазонах 17,3-18,1 ГГц и 11,7-12,5 ГГц земными станциями спутниковой связи, работающими в сетях радиовещательной спутниковой службы”.
3. Решение ГКРЧ от 4 июля 2022 г., протокол № 22-63-07 «О выделении полос радиочастот, внесении изменений в решения ГКРЧ и продлении срока действия решений ГКРЧ».
4. Регламент Радиосвязи. Издание 2020 года. Статья 21 «Наземные и космические службы, совместно использующие полосы частот выше 1 ГГц». <file:///C:/Users/%D0%91%D0%BE%D1%80%D0%B8%D1%81%20%D0%90%D0%BD%D1%82%D0%B8%D0%BF%D0%B8%D0%BD/Downloads/1.44.48.ru.601.pdf> (дата обращения: 10.05.26).
5. Приложение к решению ГКРЧ от 28 апреля 2009 г., протокол № 09-03-04-1 «Об упрощении процедуры выделения полосы радиочастот 10,7-11,7 ГГц для использования радиорелейными станциями прямой видимости».

ELECTROMAGNETIC SITUATION IN THE FREQUENCY BANDS OF JOINT USE OF THE BROADCASTING SATELLITE SERVICE AND MODERN COMMUNICATION SYSTEMS

Antipin B., Vinogradov E.

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

The description of the electromagnetic environment in which radio electronic devices operate is an important step in solving practical problems, starting from the calculation of radio paths and ending with the analysis of electromagnetic compatibility of radio devices operating in the frequency bands of common use. The development of the broadcasting satellite service and modern communication systems using common frequency bands requires attention to this issue. In particular, to analyze the electromagnetic compatibility of these radio facilities.

Depending on the form of the description of the electromagnetic environment created by the environment of the receiving equipment of the broadcasting satellite service and the information about the useful signal, different methods are used to assess the quality of the received useful signal. The paper discusses scenarios of possible conflict situations, from the point of view of ensuring electromagnetic compatibility, that may arise between these radio facilities.

Key words: *electromagnetic situation, broadcasting satellite service, modern communication systems, signal level, radio frequency spectrum*

УДК 621.396.969

ГРНТИ 47.49.31

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ЧИСЛА FTM-КАДРОВ НА ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ РАССТОЯНИЯ

Е. С. Багаев

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В работе представлен экспериментальный анализ влияния количества FTM-кадров на точность измерения расстояния по стандарту IEEE 802.11mc. Основные проблемы использования Wi-Fi FTM в помещении – многолучевое распространение, приводящее к завышению оценок дистанции, а также влияние помеховых точек доступа. Исследуется возможность повышения точности за счет увеличения числа измерительных кадров в одной сессии. Результаты эксперимента показывают, что применение большего числа FTM-кадров позволяет снизить погрешность и может использоваться в целях повышения точности оценки дальности.

беспроводные локальные сети, протокол точного измерения времени, Fine Time Measurement, IEEE 802.11mc, первичные дальномерные измерения

Востребованность систем позиционирования внутри помещений в последнее время постоянно растет. Это отражается в появлении большого количества работ на тему применения различных технологий в задачах определения местоположения (ОМП) устройств внутри помещения. Наиболее распространенными технологиями при реализации систем ОМП являются Wi-Fi [1], Bluetooth [2], RFID [3], UWB [4]. Среди всех технологий, именно позиционирование в БЛС Wi-Fi привлекает большое внимание исследователей, за счет повсеместного распространения этих систем.

В БЛС Wi-Fi методы, применяемые для ОМП устройства в общем случае можно разделить на две большие группы – методы на основе радиопечатков [5] и методы на основе измерения расстояния между устройствами [6].

Первая группа методов подразумевает составление радиокарты помещения. Такой подход требует большого количества времени и ресурсов, при этом составленная однажды радиокарта впоследствии может оказаться неактуальной из-за изменения планировки помещения, перестановки мебели или устройств. Вторая группа методов используется для определения местоположения устройства на основе первичных измерений дальности. При

этом расстояние d между устройствами может быть рассчитано на основе времени распространения сигнала между устройствами ToF (Time-of-Flight):

$$d = \frac{c}{ToF}, \quad (1)$$

где c – скорость света, м/с.

Для оценки расстояния между устройствами может применяться протокол точного измерения времени Fine Time Measurement стандарта *IEEE 802.11mc* [7]. Обмен сообщениями между этими устройствами происходит в соответствии со схемой, изображенной на рисунке 1.

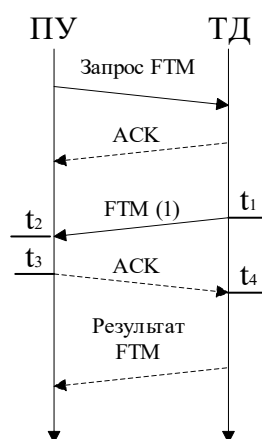


Рис. 1. Процесс обмена FTM-сообщениями

На основе временных меток, получаемых в ходе обмена сообщениями между устройствами, может быть рассчитано общее время, за которое сигнал проходит от одного устройства до другого и обратно, *RTT* (Round Trip Time):

$$RTT = \frac{1}{N_{FTM}} \left(\sum_{n=1}^{N_{FTM}} t_4(n) - \sum_{n=1}^{N_{FTM}} t_1(n) \right) - \frac{1}{N_{FTM}} \left(\sum_{n=1}^{N_{FTM}} t_3(n) - \sum_{n=1}^{N_{FTM}} t_2(n) \right) \quad (2)$$

где N_{FTM} – количество *FTM*-измерений в рамках одного пакета, n – номер текущего измерения, $t_{1...4}$ – временные метки отправки и приема сигналов.

В зависимости от условий распространения радиосигнала точность измерений *RTT* и, следовательно, точность оценки расстояния d , будут ухудшаться. Одним из наиболее критичных факторов ухудшения первичных измерений является многолучевое распространение радиосигнала.

В стандарте рабочей группы *TGax* [8] описаны модели радиоканала, для которых приведены среднеквадратические разбросы задержек многолуче-

вых компонент относительно сигнала, распространяющегося по линии прямой видимости *LoS* (*Line of Sight*) – для *Model-A* $\sigma_{\Delta t} = 0$ нс, *Model-B* $\sigma_{\Delta t} = 15$ нс; для *Model-C* $\sigma_{\Delta t} = 30$ нс.

Для оценки влияния числа *FTM*-кадров на точность первичных измерений проведем экспериментальное исследование с помощью микроконтроллеров *ESP32-S3*, обладающих поддержкой протокола *FTM*. На рисунке 2 приведена схема проведения эксперимента. Один из микроконтроллеров выполнял роль точки доступа, другой – пользовательского устройства. Обмен измерениями проводился в опорных точках, расположенных на расстоянии 1 метра друг от друга, помещение для проведения эксперимента представляет собой учебную лабораторию размером 6 на 10 метров с расположенными по периметру столами. Для такого сценария характерен высокий уровень многолучевости, соответствующий модели *TGax Model-C*.

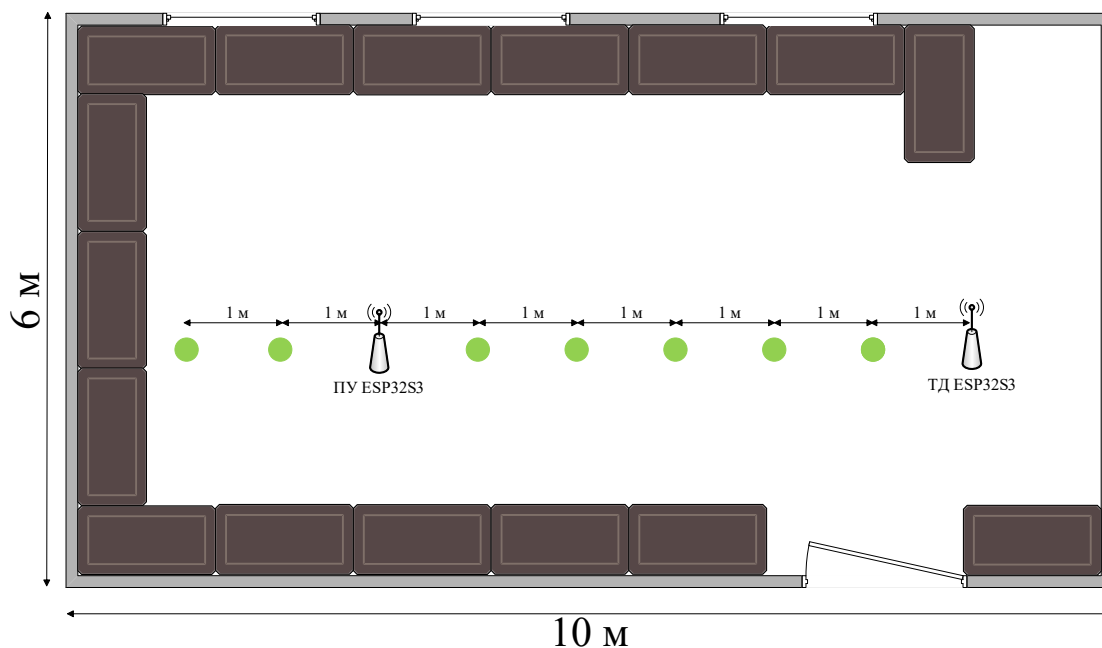


Рис. 2. Сценарий проведения эксперимента

Расчет *RTT* производился в соответствии с формулой 2 по результатам усреднения измерений по количеству кадров $N_{FTM} = 8$ и $N_{FTM} = 24$. Расстояние между устройствами рассчитывалось как $d = c/RTT$.

На рисунке 3 представлены результаты измерения расстояния в опорных точках.

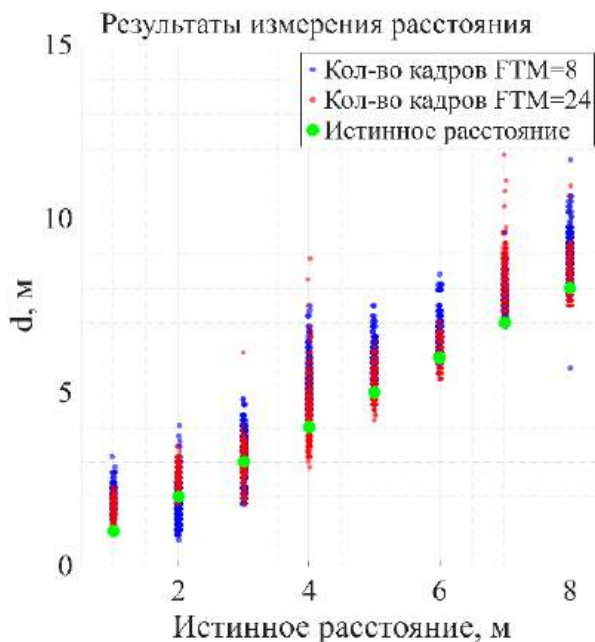


Рис. 3. Результаты измерения расстояния

На рисунке 4 приведены графики абсолютных ошибок при определении d в зависимости от N_{FTM} .

Как видно из графика, увеличение N_{FTM} позволяет снизить значения максимального абсолютного отклонения измеренного расстояния $d_{изм}$ от истинного d . Так, при $N_{FTM} = 8$ $\Delta d_{max} = 6,5$ м; при $N_{FTM} = 24$ $\Delta d_{max} = 5,54$ м. При этом среднее отклонение Δd также уменьшается – при $N_{FTM} = 8$ $\overline{\Delta d} = 0,59$ м; при $N_{FTM} = 24$ $\overline{\Delta d} = 0,43$ м.

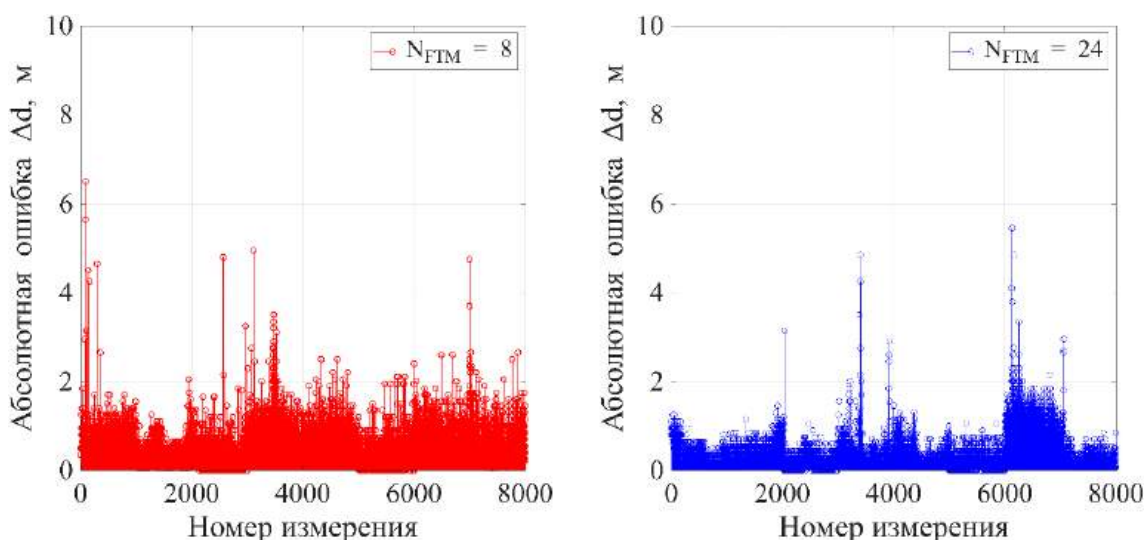


Рис. 4. Результаты измерения расстояния

На рисунке 5 приведен график интегральной функции распределения абсолютной ошибки измерения дальности Δd при $N_{FTM} = 8$ и $N_{FTM} = 24$.

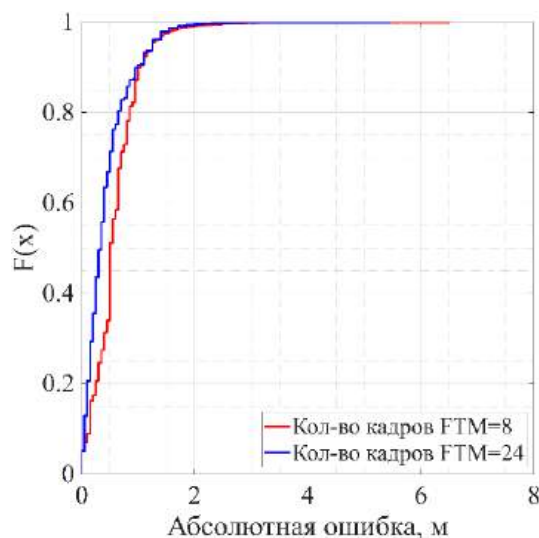


Рис. 5. Результаты измерения расстояния

График на рисунке 5 демонстрирует, что при усреднении результатов расчета RTT по большему количеству N_{FTM} достижимая точность определения расстояния остается практически неизменной при описанном сценарии. С вероятностью 90 % абсолютная ошибка Δd достигает значения в 1 м. При этом медианная ошибка меняется незначительно – с 0,59 до 0,43 м.

Представленные в работе результаты говорят о том, что увеличение количества N_{FTM} в рамках сбора первичных измерений RTT может снизить величину аномальных отклонений при расчете расстояния между устройствами. Однако, увеличение числа N_{FTM} в 3 раза не приводит к заметному улучшению. Дальнейшие подходы к повышению точности первичных дальномерных измерений, проводимых по протоколу FTM могут включать в себя методы машинного обучения, постобработку измерений и предварительную калибровку устройств.

Список используемых источников

1. Dai J. et al. A survey of latest Wi-Fi assisted indoor positioning on different principles // *Sensors*. 2023. Т. 23. № 18. С. 7961.
2. De Blasio G. S. et al. Bluetooth low energy technology applied to indoor positioning systems: An overview // *International Conference on Computer Aided Systems Theory*. Cham: Springer International Publishing, 2019. С. 83-90.
3. Bai Y. B. et al. Overview of RFID-Based Indoor Positioning Technology // *GSR*. 2012. Т. 2012.
4. Mazhar F., Khan M. G., Sällberg B. Precise indoor positioning using UWB: A review of methods, algorithms and implementations // *Wireless Personal. Communications*. 2017. Т. 97. №. 3. С. 4467-4491.
5. Shang S., Wang L. Overview of WiFi fingerprinting-based indoor positioning // *Iet Communications*. 2022. Т. 16. № 7. С. 725-733.

6. Yang C., Shao H. R. WiFi-based indoor positioning //IEEE Communications Magazine. 2015. Т. 53. № 3. С. 150-157.

7. IEEE Std 802.11-2016. IEEE Standard for Information Technology. Telecommunications and Information Exchange between Systems Local and Metropolitan Area Networks. Specific Requirements. Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. N.Y., 2016. 3534 p.

8. IEEE 802.11ax Task Group. Channel Model Document. URL: https://www.ieee802.org/11/Reports/tgax_update.html (дата обращения: 20.02.2025).

Статья представлена научным руководителем, профессором кафедры БТС СПбГУТ, доктором технических наук, доцентом Г. А. Фокиным.

ANALYSIS OF THE EFFECT OF THE NUMBER OF FTM-FRAMES ON THE ACCURACY OF DISTANCE MEASUREMENT

Bagaev E.

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

The paper presents an experimental analysis of the effect of the number of FTM frames on the accuracy of distance measurement according to the IEEE 802.11mc standard. The main problems of using Wi-Fi FTM indoors are multipath propagation, which leads to overestimation of the distance, and the influence of interfering access points. The paper explores the possibility of improving accuracy by increasing the number of measurement frames in a single session. The experimental results show that using more FTM frames can reduce the error and can be used to improve the accuracy of range estimation.

Key words: WLANs, Fine Time Measurement protocol, IEEE 802.11mc, ranging measurements

УДК 519.872.6

ГРНТИ 49.03.09

АНАЛИЗ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ТРЕБУЕМОЙ ЕМКОСТИ КАНАЛОВ СВЯЗИ К НАГРУЗКЕ В СИСТЕМАХ С ПОТЕРЯМИ НА ОСНОВЕ ФОРМУЛЫ ЭРЛАНГА-В

К. А. Батенков

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова

Представлено исследование зависимости минимального количества каналов связи от интенсивности трафика в системах с потерями, работающих в соответствии с моделью Эрланга-В. Проведен сравнительный анализ требуемой емкости системы при различных значениях коэффициента качества обслуживания GoS (Grade of Service). Показано, что традиционный подход к определению емкости на основе средней нагрузки приводит к существенному занижению необходимого количества каналов. Продемонстрирована важность учета вероятностной природы трафика и использования перцентильного анализа при планировании мощности телекоммуникационных систем. Разработана методика определения оптимального запаса прочности при проектировании магистральных трактов связи. Результаты исследования показывают, что для обеспечения заданного качества обслуживания при интенсивности нагрузки восемнадцать Эрланг требуется двадцать восемь каналов, что на пятьдесят шесть процентов превышает среднюю нагрузку. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании сетей связи нового поколения, включая системы VoIP и центры обработки вызовов.

формула Эрланга-В, телеграфная инженерия, качество обслуживания, планирование емкости, перцентильный анализ, потери вызовов, оптимизация сети

Современные телекоммуникационные системы требуют точного планирования емкости для обеспечения заданного уровня качества обслуживания при оптимальных капитальных затратах. Формула Эрланга-В, разработанная более века назад, остается фундаментальным инструментом для расчета вероятности блокировки вызовов в системах с потерями [1]. Несмотря на появление новых технологий, таких как VoIP и 5G, классические модели телетрафика сохраняют свою актуальность для задач планирования магистральных каналов связи [2, 3].

Основная проблема при проектировании систем связи заключается в определении оптимального количества каналов, которое должно удовлетворять двум противоречивым требованиям: минимизации затрат на инфраструктуру и обеспечению заданного качества обслуживания. Традицион-

ный подход, основанный на использовании средней нагрузки, не учитывает стохастическую природу трафика и может приводить к существенным ошибкам при планировании [4, 5].

Целью данного исследования является анализ чувствительности требуемой емкости системы к изменениям интенсивности нагрузки и разработка рекомендаций по определению оптимального запаса прочности при проектировании трактов связи.

Рассмотрим систему массового обслуживания типа М/М/ m / m с потерями, где m – количество каналов. Вероятность блокировки вызова определяется формулой Эрланга-В [6]:

$$B(m, A_0) = \frac{\frac{A_0^m}{m!}}{\sum_{k=0}^m \frac{A_0^k}{k!}}$$

где $A_0 = \lambda/\mu$ – предложенная нагрузка в Эрлангах, λ – интенсивность поступления вызовов, μ – интенсивность обслуживания.

Для численно устойчивого вычисления используется рекуррентная форма:

$$B(0, A_0) = 1$$
$$B(m, A_0) = \frac{A_0 \cdot B(m-1, A_0)}{m + A_0 \cdot B(m-1, A_0)}$$

Задача проектирования системы заключается в нахождении минимального количества каналов m_{GoS} , обеспечивающего заданный коэффициент качества обслуживания:

$$m_{GoS} = \min\{m: B(m, A_0) \leq GoS\}$$

Для сравнения с идеальной системой рассмотрим модель М/М/ ∞ с бесконечным числом каналов. В этой модели число занятых каналов распределено по закону Пуассона с параметром A_0 :

$$P(k) = e^{-A_0} \frac{A_0^k}{k!}$$

Перцентиль m_p определяется как минимальное целое число, удовлетворяющее условию:

$$\sum_{k=0}^{m_p} P(k) \geq p$$

где p – уровень доверия (0,90, 0,95, 0,99).

На рисунке 1 представлена зависимость минимального количества каналов m_{GoS} от интенсивности нагрузки A_0 при $GoS = 1\%$. График демонстрирует несколько важных характеристик.

Нелинейный рост емкости. Зависимость $m_{GoS}(A_0)$ имеет нелинейный характер, что обусловлено вероятностной природой блокировки вызовов.

Запас прочности. Разница между m_{GoS} и средней нагрузкой A_0 представляет собой необходимый запас прочности системы. Для $A_0 = 18$ Эрланг требуется $m_{GoS} = 28$ каналов, что на 56 % превышает среднюю нагрузку.

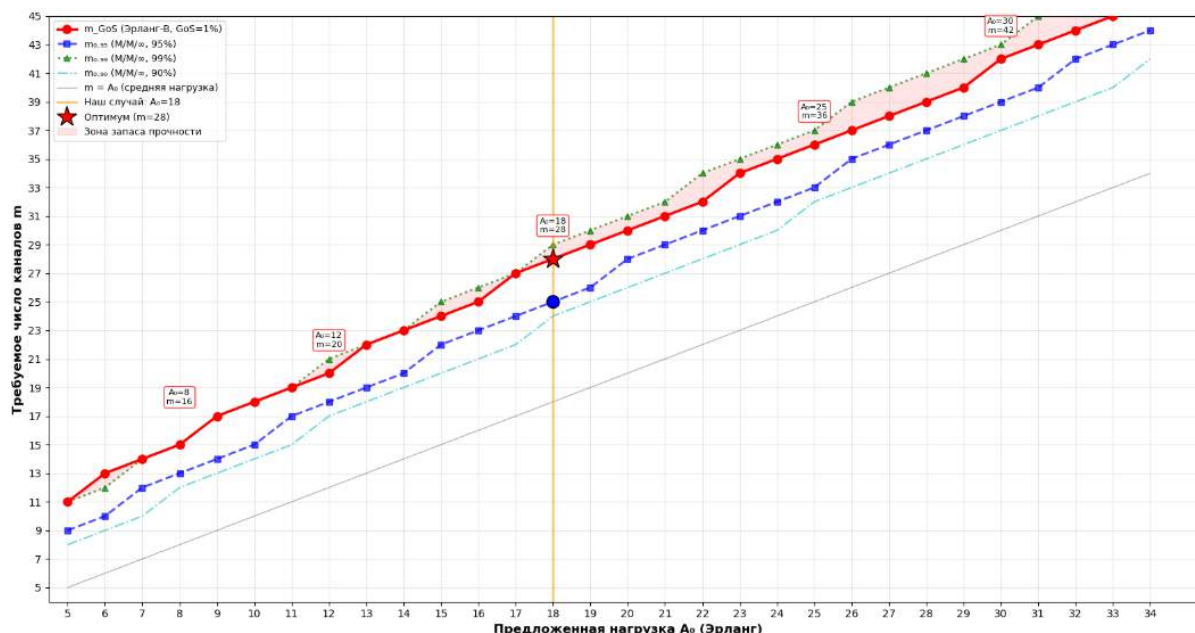


Рис. 1. Зависимость минимального количества каналов m_{GoS} от интенсивности нагрузки A_0 при $GoS = 1\%$

Сравнение с перцентилями. Кривая m_{GoS} располагается между 95-м и 99-м перцентилями распределения М/М/∞, что подтверждает необходимость учета пиковых значений нагрузки.

Рассмотрим характерные точки на графике:

- точка А ($A_0 = 8$, $m = 16$): при низкой нагрузке коэффициент использования каналов составляет 50 %, что указывает на избыточность ресурсов;
- точка В ($A_0 = 12$, $m = 20$): коэффициент использования увеличивается до 60 %, система становится более эффективной;

- точка С ($A_0 = 18, m = 28$): оптимальная точка с коэффициентом использования 64.3 %. Эта точка обеспечивает баланс между качеством обслуживания и эффективностью использования ресурсов;
- точка D ($A_0 = 25, m = 36$): при высокой нагрузке коэффициент использования достигает 69.4 %, однако абсолютные потери вызовов возрастают;
- точка E ($A_0 = 30, m = 42$): дальнейшее увеличение нагрузки приводит к необходимости значительного наращивания емкости.

Заштрихованная область на рисунке 1 представляет зону запаса прочности – разницу между требуемым количеством каналов и средней нагрузкой. Эта зона обеспечивает устойчивость системы к флуктуациям трафика и гарантирует заданный уровень качества обслуживания.

Ширина зоны запаса прочности возрастает с увеличением нагрузки, что объясняется ростом абсолютных отклонений в пуассоновском процессе. Относительная ширина зоны (в процентах от A_0) уменьшается, что свидетельствует об эффекте масштаба.

На основе проведенного анализа предлагаем следующую методику проектирования трактов связи:

- определение пиковой нагрузки – рассчитать интенсивность трафика в час наибольшей нагрузки (ЧНН) на основе статистических данных;
- выбор норматива GoS – установить требуемый коэффициент качества обслуживания в зависимости от типа трафика и требований пользователей:
 - для критически важных приложений: $GoS = 0.1 \% - 1 \%$;
 - для стандартной телефонии: $GoS = 1 \% - 2 \%$;
 - для колл-центров: $GoS = 2 \% - 5 \%$;
- расчет емкости – использовать рекуррентную формулу Эрланга-В для определения минимального количества каналов m_{GoS} ;
- проверка запаса прочности – убедиться, что запас прочности $\Delta m = m_{GoS} - [A_0]$ составляет не менее 30-50 % от средней нагрузки.

При проектировании необходимо учитывать компромисс между капитальными затратами (CAPEX) на приобретение оборудования и операционными затратами (OPEX), связанными с потерей вызовов. Оптимальное количество каналов минимизирует суммарную стоимость владения системой.

Хотя формула Эрланга-В разработана для классических телефонных сетей, она находит применение в современных технологиях:

- VoIP сети: для планирования магистральных каналов между шлюзами;
- Колл-центры: для определения количества операторов;

- ЦОД: для планирования вычислительных ресурсов;
- 5G сети: для оценки емкости каналов передачи данных.

В статье проведен анализ чувствительности требуемой емкости трактов связи к интенсивности нагрузки на основе формулы Эрланга-В. Показано, что для обеспечения заданного качества обслуживания необходимо учитывать вероятностную природу трафика и предусматривать запас прочности не менее 30-50 % от средней нагрузки.

Разработанная методика позволяет определить оптимальное количество каналов, обеспечивающее баланс между качеством обслуживания и эффективностью использования ресурсов. Результаты исследования могут быть использованы при проектировании как классических телефонных сетей, так и современных систем связи на базе IP-технологий.

Перспективным направлением дальнейших исследований является разработка адаптивных алгоритмов управления емкостью с учетом временных характеристик трафика и применения методов машинного обучения для прогнозирования нагрузки.

Список используемых источников

1. Hang Yang, Jing Fu, Jingjin Wu, Moshe Zukerman, A study of a loss system with priorities, *Heliyon*, Volume 10, Issue 16, 2024, e36109, ISSN 2405-8440, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e36109>.
2. Mišuth T. and Baroňák I. Application of Erlang B model in modern VoIP networks // 2011 34th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP), Budapest, Hungary, 2011. PP. 235-239. DOI: 10.1109/TSP.2011.6043736.
3. Ali H. M., Liu J., Ejaz W. Planning capacity for 5G and beyond wireless networks by discrete fireworks algorithm with ensemble of local search methods // *J Wireless Com Network* 2020, 185 (2020). URL: <https://doi.org/10.1186/s13638-020-01798-y> (дата обращения 10.05.2026).
4. Cruz-Pérez F. A., Hernandez-Valdez G., Rico-Páez A., Castellanos-López S. L., Miranda-Tello J. R., Pérez-Sánchez G. G., Vázquez-Cerón E. R. Performance Sensitivity to the High-Order Statistics of Time Interval Variables in Cellular Networks // *Mobile Information Systems*. 2020. Vol. 2020. Art. ID 1347601. 16 p. DOI: 10.1155/2020/1347601.
5. Батенков К. А. Анализ надежности двухполюсных сетей связи на основе метода приведения (редукции) / К. А. Батенков // *Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника*. 2025. Т. 28. № 6. С. 56-70. DOI 10.32603/1993-8985-2025-28-6-56-70. EDN HXNUDF.
6. Cruz-Pérez F. A., S. L. Castellanos-López and G. Hernández-Valdez Queueing Systems With Fractional Number of Servers: Analysis and Practical Implementation of the Erlang-B Traffic Model // in *IEEE Access*, 2024. Vol. 12. PP. 166268-166280. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3491637.

**ANALYSIS OF THE SENSITIVITY OF THE REQUIRED CAPACITY
OF COMMUNICATION PATHS TO LOAD IN LOSSY SYSTEMS BASED
ON THE ERLANG-B FORMULA**

Batenkov K.

Lomonosov Moscow State University

A study of the dependence of the minimum number of communication channels on traffic intensity in lossy systems operating in accordance with the Erlang-B model is presented. A comparative analysis of the required system capacity was carried out at different values of the GoS (Grade of Service) quality factor. It is shown that the traditional approach to determining capacity based on the average load leads to a significant underestimation of the required number of channels. The importance of taking into account the probabilistic nature of traffic and the use of percentile analysis when planning the capacity of telecommunication systems is demonstrated. A method for determining the optimal safety margin in the design of main communication paths has been developed. The results of the study show that twenty-eight channels are required to ensure a given quality of service at a load intensity of eighteen Erlang, which is fifty-six percent higher than the average load. The results obtained can be used in the design of next-generation communication networks, including VoIP systems and call centers.

Key words: Erlang formula-B, telegraphic engineering, quality of service, capacity planning, percentile analysis, call loss, network optimization

УДК 004.93'1

ГРНТИ 28.23.15

АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА ПОВЕДЕНИЯ ВОДИТЕЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ

И. С. Бачагов

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Основная цель работы заключается в комплексном анализе и систематизации современных интеллектуальных систем мониторинга поведения водителей, направленных на повышение безопасности дорожного движения с использованием систем компьютерного зрения. В статье рассматривается актуальность внедрения таких систем в связи с увеличением происшествий на дорогах, причиной которых является человеческий фактор. Ключевым методом, рассматриваемым в работе, является применение технологий компьютерного зрения и алгоритмов глубокого обучения. В статье произведен анализ архитектур сверточных нейронных сетей, включая VGG-16, ResNet50, MobileNetV2 и YOLOv8. В работе подробно классифицируются типы отслеживаемого поведения человека за рулем. Системы обучаются распознавать специфические позы водителя при разговоре по телефону или наборе текстовых сообщений. Результаты показали, что автоматизированный мониторинг на базе нейросетевых моделей является критически важным инструментом для повышения безопасности.

компьютерное зрение, нейронные сети, MobileNetV2, ResNet50, YOLOv8, VGG-16, обучение с переносом знаний, интеллектуальные транспортные системы

Обеспечение безопасности дорожного движения является приоритетной государственной задачей, закрепленной в «Транспортной стратегии РФ до 2030 года с прогнозом до 2035 года», которая провозглашает принцип «нулевой терпимости» к смертности на дорогах [1]. Анализ показывает, что до 90 % дорожно-транспортных происшествий вызваны «человеческим фактором», в частности, отвлеčenным поведением водителей из-за использования мобильных телефонов.

В работе рассматривается применение технологий компьютерного зрения на базе современных архитектур сверточных нейронных сетей. Ключевыми объектами анализа являются модели MobileNetV2, ResNet50, YOLOv8 и SSD+FPN, каждая из которых адаптирована под конкретные сценарии эксплуатации. Модель MobileNetV2 выделяется как наиболее сбалансированное решение для бортовых систем автомобиля. Для оперативного поиска

мобильных телефонов в руках водителей применяется YOLOv8, а связка детектора SSD с сетью пирамид признаков используется в придорожной инфраструктуре для распознавания уязвимых участников движения в сложных метеоусловиях. Целью данной работы является комплексный и систематизация эффективности нейросетевых архитектур в задачах мониторинга поведения человека за рулем. Результаты исследования направлены на поиск оптимальных технологических решений для интеграции в интеллектуальные транспортные системы и реализацию стратегии повышения безопасности дорожного движения.

1. Анализ нейросетевых методов для систем мониторинга

Эффективность интеллектуальной транспортной системы напрямую зависит от выбора архитектуры нейронной сети, которая должна обеспечивать баланс между точностью распознавания и вычислительными затратами [2]. В рамках исследования были проанализированы четыре ключевые модели: VGG-16, ResNet50, MobileNetV2 и YOLOv8, каждая из которых имеет свою специализацию и аппаратные требования [3, 4].

VGG-16 и ResNet50 представляют собой примеры глубоких сетей, ориентированных на высокую точность. VGG-16 обладает крайне высокой вычислительной сложностью из-за избыточности полносвязных слоев, в то время как ResNet50 использует «остаточные связи» для эффективного обучения глубоких структур при 25,6 млн параметров [5]. В иерархии мониторинга эти модели лучше всего подходят для серверного анализа или мощных краевых узлов, где требуется глубокая классификация сложных поз водителя по архивным записям [6].

MobileNetV2 и YOLOv8 ориентированы на мобильность и скорость работы в реальном времени. MobileNetV2 специально разработана для устройств с ограниченными ресурсами, что позволило сократить количество параметров до 3,5 млн при сохранении точности распознавания поз до 98,12–99,68 %. В свою очередь, YOLOv8, являясь одностадийным детектором, обеспечивает беспрецедентную скорость при поиске малоразмерных объектов, таких как смартфоны, что делает эти модели идеальными для бортовых устройств автомобилей и «умных» дорожных камер.

2. Анализ результатов сравнения моделей на базе нейронных сетей

Для оценки применимости различных подходов в рамках данного исследования был проведен сравнительный анализ результатов тестирования четырех ключевых архитектур, представленный на таблице 1.

ТАБЛИЦА 1. Сравнительные характеристики архитектур нейронных сетей

Название модели	Кол-во параметров (млн)	Область применения	Преимущества	Ограничения
VGG-16	138,3	Облачные серверы, ретроспективный анализ	Высокая точность, классическая архитектура	Огромный вес (528 МБ), низкая скорость
ResNet50	25,6	Мощные краевые узлы (Edge), детальный разбор	Высокая стабильность глубоких сетей	Требовательность к ресурсам GPU
MobileNetV2	3,5	Бортовые системы ТС, мобильные ADAS	Минимальное энергопотребление, высокая скорость	Ограниченная емкость для сверхсложных сцен
YOLOv8	от 3,2	Дорожные камеры, детекция нарушений	Сверхвысокая скорость, детекция за один проход	Зависимость точности от разрешения и обучения

Ключевой характеристикой нейросетевых архитектур, определяющей их применимость в интеллектуальных транспортных системах, является количество обучаемых параметров. Под параметрами в данном контексте понимается совокупность весовых коэффициентов и смещений (biases) нейронной сети, формирующихся в процессе обучения. Модели (MobileNetV2) необходимы для мгновенной реакции внутри автомобиля, тогда как высокопроизводительные детекторы (YOLO) и аналитические сети (ResNet/VGG) обеспечивают контроль на уровне городской инфраструктуры и центров обработки данных. Правильное распределение вычислительной нагрузки позволяет системе функционировать в режиме реального времени при ограниченных ресурсах бортовых устройств.

Важным аспектом является то, что эффективность даже наиболее сбалансированной нейросети деградирует при поступлении видеопотока низкого качества, что демонстрируется на таблице 2.

ТАБЛИЦА 2. Влияние параметров видеообработки на точность мониторинга

Параметр	Воздействие на видеопоток	Влияние на ИИ-анализ	Критический порог/последствие
Параметр квантования (QP)	Принудительное удаление мелких деталей и текстур	Потеря способности различать границы и дескрипторы объектов	QP > 38: критическое падение точности распознавания
Битрейт	Снижение объема данных, агрессивное сглаживание	Смартфон сливается с фоном из-за потери контраста	Потеря визуальных признаков, необходимых для классификации поз
Сетевые потери	Разрушение структуры группы кадров (GOP)	Срыв трекинга, смена ID объекта, потеря цели	Потеря I-кадра
Задержка	Неравномерность времени доставки пакетов	Нарушение синхронизации видео и метаданных	Задержка > 0,5 с: невозможность оперативного реагирования
Межкадровая компрессия	Использование P и B кадров для предсказания движения	Ошибки кодека наслаиваются на ошибки нейросети	Артефакты при резких жестах, ведущие к ложным срабатываниям

Сжатие видео в кодеках основано на удалении информации, избыточной для человеческого глаза, но критически важной для математических дескрипторов нейросети. При значении параметра квантования QP выше 38 точность распознавания лиц и визуального поиска падает. Сильная компрессия искажает изображение смартфона в руке водителя из-за чего система не находит нарушения правил дорожного движения.

Кроме того, фактором, негативно влияющим на работу системы, являются сетевые потери. При отсутствии I-кадра последующие P- и B-кадры становятся недоступными для корректного восстановления. Это снижает устойчивость работы алгоритмов отслеживания объектов, включая DeepSORT, так как они могут терять соответствие между объектом и его уникальным идентификатором.

3. Гибридные решения интеллектуальных систем

Перспективным направлением развития систем мониторинга является создание гибридных интеллектуальных решений, объединяющих методы видеоаналитики с информацией, поступающей от различных типов датчиков.

Одним из наиболее эффективных подходов считается совместное использование технологий компьютерного зрения и радиочастотного (РЧ) мониторинга. В концепциях «Умного города» и когнитивных радиосетей (CRN) инфраструктура уже выполняет непрерывный анализ радиочастотного спектра для обнаружения свободных каналов связи [7]. Применение этих возможностей в задачах обеспечения безопасности позволяет повысить надежность обнаружения мобильных устройств.

В такой системе проверка осуществляется на двух уровнях:

- визуальный уровень – нейросетевая модель анализирует видеопоток и выявляет признаки использования смартфона, например характерное положение рук водителя или контуры мобильного устройства;
- радиочастотный уровень – когнитивная подсистема регистрирует электромагнитную активность в диапазонах LTE/5G или Wi-Fi и сопоставляет источник сигнала с координатами конкретного транспортного средства.

Совместная обработка данных снижает вероятность ложных срабатываний, возникающих в случаях, когда алгоритм компьютерного зрения принимает посторонний предмет за мобильный телефон. Кроме того, радиочастотный мониторинг позволяет фиксировать работу мобильного устройства даже тогда, когда оно не попадает в поле зрения камеры или частично закрыто другими объектами [8].

Проведенное исследование подтверждает, что контроль поведения водителей является важной составляющей современных систем обеспечения безопасности дорожного движения. Выполненный анализ показал, что нейросетевые модели, в частности MobileNetV2, уже обладают достаточной эффективностью для практического применения в интеллектуальных транспортных системах. Вместе с тем дальнейшее развитие таких решений связано не только с совершенствованием алгоритмов компьютерного зрения, но и с их интеграцией с данными, поступающими от других типов датчиков.

Список используемых источников

1. Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года: утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 27 ноября 2021 г. № 3363-р. Москва, 2021.

2. ao W., Tian Y. H., Wang J. Digital retina: revolutionizing camera systems for the smart city (数字视网膜: 智慧城市系统演进的关键环节) // Scientia Sinica Informationis (中国科学: 信息科学). 2018. Vol. 48. № 8. P. 1076–1082.
3. Hossain M. U., Rahman M. A., Islam M. M. et al. Automatic driver distraction detection using deep convolutional neural networks // Intelligent Systems with Applications. 2022. Vol. 14. Art. 200075.
4. Charef A., Jarir Z., Quafafou M. Detection of Mobile Phone Usage Among Motorcycle Riders: A Computer Vision Approach // Innovations in Electrical and Electronics Engineering. Lecture Notes in Electrical Engineering. – Singapore: Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2025. Vol. 1295. P. 423–432.
5. Rahman M. A., Mammeri A., Metari S. Intelligent Infrastructure for Enhancing Vulnerable Road User Safety using Machine Vision Technologies // International Journal of Intelligent Transportation Systems Research. 2025. Vol. 23. P. 1179–1196.
6. Bradai A., Singh K., Rachedi A., Ahmed T. EMCOS: Energy-efficient Mechanism for Multimedia Streaming over Cognitive Radio Sensor Networks // Computer Communications. 2023. Vol. 202. Iss. 9. DOI: 10.1016/j.comcom.2023.02.007.
7. Bradai A., Ahmed T. ReViV: Selective Rebroadcast Mechanism for Video Streaming over VANET // [IEEE Vehicular Technology Conference (VTC)]. 2013. P. 1–5.
8. Bradai A., Ahmed T., Benslimane A. ViCoV: Efficient Video Streaming for Cognitive Radio VANET // Vehicular Communications. 2014. Vol. 1. PP. 18.

Статья представлена научным руководителем, заведующим кафедрой ЦТМ СПбГУТ, кандидатом технических наук, доцентом С. Л. Фёдоровым.

ANALYSIS OF CURRENT DRIVER BEHAVIOR MONITORING SYSTEMS BASED ON COMPUTER VISION

Bachagov I.

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

The primary objective of this study is to provide a comprehensive analysis and systematization of modern intelligent driver behavior monitoring systems designed to enhance road safety through the use of computer vision. The article addresses the relevance of implementing such systems in light of the increasing number of road accidents caused by human factors. The core methodology discussed in the work involves the application of computer vision technologies and deep learning algorithms. The paper analyzes various convolutional neural network architectures, including VGG-16, ResNet50, MobileNetV2, and YOLOv8. Furthermore, it provides a detailed classification of monitored driver behaviors. The systems are trained to recognize specific driver postures, such as talking on the phone or texting while driving. The results demonstrate that automated monitoring based on neural network models is a critical tool for improving traffic safety.

Key words: computer vision, neural networks, MobileNetV2, ResNet50, YOLOv8, VGG-16, transfer learning, intelligent transportation systems

УДК 004.722.3

ГРНТИ 47.41.25

**ДИНАМИЧЕСКАЯ КЛАСТЕРИЗАЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ
SDN-КОНТРОЛЛЕРОВ ДЛЯ ИНФРАСТРУКТУРЫ CITIVERSE****М. А. Белов, М. Н. Меразга, А. С. А. Мутханна**

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Инфраструктура CitiVerse объединяет тысячи граничных и туманных узлов городской среды: камеры видеонаблюдения, датчики, автономный транспорт. По мере роста их числа управление сетью, масштабирование и распределение ресурсов превращаются в самостоятельную инженерную задачу. Программно-конфигурируемые сети (SDN) дают инструмент для централизованного управления подобной средой, но применяемые сегодня статические схемы кластеризации и размещения контроллеров рассчитаны на фиксированную топологию и не пересматриваются при изменении трафика. В работе рассмотрены подходы к динамической кластеризации распределенных SDN-контроллеров, минимизирующие внутрикластерную задержку и накладные расходы межконтроллерного взаимодействия при сохранении пропускной способности сети применительно к городской инфраструктуре CitiVerse.

программно-конфигурируемые сети, SDN-контроллер, динамическая кластеризация, CitiVerse, граничные вычисления, глубокое обучение с подкреплением, балансировка нагрузки, внутрикластерная задержка

1. Введение

CitiVerse относят к новому классу городских киберфизических систем: транспортные узлы, камеры видеонаблюдения, экологические датчики и автономный транспорт объединяются с цифровым слоем обработки данных в реальном времени [1, 2]. Трафик в такой среде крайне неоднороден: от фоновоего мониторинга датчиков до резких всплесков при авариях или массовых городских мероприятиях.

При распределенной плоскости управления, где каждый коммутатор принимает решения локально, согласованность политик при тысячах узлов быстро выходит из-под контроля. SDN решает эту проблему за счет разделения плоскости управления и плоскости данных: сетевые политики вычисляются централизованно, а их применение и оркестрация ресурсов упрощаются [3, 4].

Единственный контроллер, впрочем, сам становится узким местом по производительности и единой точкой отказа. Переход к нескольким распределенным контроллерам снимает эту проблему, но добавляет новую: сеть нужно разбить на кластеры и закрепить каждый кластер за контроллером. Для сети со стабильной топологией такое разбиение можно выполнить один раз и не пересматривать. В CitiVerse топология и нагрузка меняются непрерывно, поэтому статическая кластеризация быстро перестает соответствовать реальному состоянию сети.

Ниже рассмотрены основные подходы к кластеризации SDN-контроллеров, показаны их ограничения применительно к CitiVerse и рассмотрена альтернатива: динамическая кластеризация на основе обучения с подкреплением, в частности алгоритма Deep Q-Network (DQN) [5, 6].

2. Особенности CitiVerse-инфраструктуры как объекта управления

Постановка задачи кластеризации для CitiVerse требует учитывать несколько характеристик, которые отличают такую среду от корпоративных или операторских сетей.

Масштаб и гетерогенность узлов. Городская сеть включает сотни-тысячи узлов разных классов: стационарные датчики с предсказуемой нагрузкой, подвижные объекты (транспорт, дроны) с меняющейся топологической привязкой, и граничные серверы с высокой вычислительной емкостью [7]. Требования к задержке и надежности у этих классов узлов различаются на порядок.

Динамика трафика. Нагрузка колеблется по суточному циклу, с пиками утром и вечером, и время от времени резко возрастает при городских событиях или инцидентах; интенсивность трафика при этом может меняться на несколько порядков [8].

Чувствительность к задержке. Управление транспортным потоком, системы экстренного реагирования и видеоаналитика критичны к сквозной задержке, и ее основной вклад формирует внутрикластерная задержка (Intra-Cluster Delay, ICD) – время между коммутатором и его контроллером.

3. Обзор существующих подходов к кластеризации SDN-контроллеров

3.1. Единый централизованный контроллер

Простейший вариант: единый SDN-контроллер на всю сеть. Он дает полную согласованность политик и простую администрируемость, но мас-

штабируется плохо: с ростом числа узлов контроллер упирается в собственные вычислительные ресурсы и пропускную способность канала управления. Отказ такого контроллера означает потерю управляемости всей сети, а для критической городской инфраструктуры это неприемлемый сценарий.

3.2. Статическое размещение контроллеров

Задача размещения SDN-контроллеров (Controller Placement Problem, CPP) состоит в выборе позиций для фиксированного числа контроллеров так, чтобы минимизировать среднюю задержку коммутатор-контроллер при заданных ограничениях на емкость. Целочисленное линейное программирование и эвристики на графовых метриках решают CPP достаточно точно, пока топология не меняется.

Проблема в том, что разбиение на кластеры фиксируется один раз и не пересматривается при изменении нагрузки. В CitiVerse, где трафик меняется в реальном времени, такое решение устаревает быстро: одни контроллеры простаивают, другие перегружены, а ICD в возникающих «горячих» зонах резко растет.

3.3. Кластеризация методом K-means

K-means разбивает коммутаторы на k кластеров, минимизируя суммарную латентность от каждого коммутатора до центроида его кластера [9]. Метод прост в реализации, результаты легко интерпретировать, и в ряде работ K-means запускают периодически, переразбивая кластеры при существенном изменении топологии.

Для CitiVerse у K-means три системных ограничения. Алгоритм минимизирует только геометрическое расстояние и не учитывает текущую загрузку контроллеров. Перезапуск кластеризации требует заметного вычислительного времени и плохо совместим с реальным временем. Наконец, число кластеров k фиксируется заранее, а в CitiVerse оптимальное число контроллеров зависит от текущей нагрузки и должно меняться вместе с ней.

3.4. Алгоритмы на основе графовых метрик и эвристик

Спектральная кластеризация, алгоритмы разрезания графа и эвристики на метриках связности учитывают структуру сети точнее, чем K-means, и позволяют закладывать ограничения на задержку. Общий для них недостаток тот же, что у статических методов в целом: разбиение выполняется

заранее или по явной команде на переразбиение, а не подстраивается под сеть непрерывно.

4. Постановка задачи динамической кластеризации

Формально задача динамической кластеризации в CitiVerse-сети формулируется следующим образом.

Пусть задана сеть, состоящая из множества коммутаторов/граничных узлов $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ и множества SDN-контроллеров $C = \{c_1, c_2, \dots, c_k\}$. Бинарная матрица назначения A , где $A_{ij} = 1$ означает, что коммутатор s_i закреплен за контроллером c_j , определяет разбиение сети на кластеры.

Целевая функция, подлежащая минимизации, имеет вид:

$$F = \alpha \cdot ICD + \beta \cdot ICC - \gamma \cdot Throughput, \quad (1)$$

где ICD (Intra-Cluster Delay) – средняя задержка между коммутаторами и их контроллерами; ICC (Inter-Controller Communication) – накладные расходы на межконтроллерное взаимодействие; Throughput – суммарная пропускная способность сети; α, β, γ – весовые коэффициенты.

В отличие от CPP, матрица назначений A здесь не фиксирована: она пересматривается в реальном времени по мере изменения состояния сети. Задача из однократной оптимизации превращается в задачу последовательного принятия решений, а для этого класса задач методы обучения с подкреплением подходят лучше всего.

5. Динамическая кластеризация на основе Deep Q-Network

5.1. Обоснование выбора DQN

В глубоком обучении с подкреплением (Deep Reinforcement Learning, DRL) агент подбирает решения через взаимодействие со средой, без явно заданных правил. DQN сочетает Q-обучение с аппроксимацией функции ценности нейронной сетью, что и дает возможность работать с высокоразмерными пространствами состояний [10].

Для динамической кластеризации это дает три практических преимущества. Агент накапливает опыт взаимодействия с сетью и постепенно улучшает качество решений. После обучения решение принимается за миллисекунды, чего достаточно для работы в реальном времени. И поскольку вознаграждение задается одной скалярной функцией, агент одновременно балансирует несколько конкурирующих метрик, а не оптимизирует их по очереди.

5.2. Структура DQN-агента

DQN-агент для задачи кластеризации оперирует тремя ключевыми компонентами.

Пространство состояний. Состояние s_t описывает конфигурацию сети в момент t : матрицу назначений коммутаторов контроллерам, вектор нагрузок по коммутаторам, матрицу задержек коммутатор-контроллер, а также текущие пропускную способность кластеров и задержки между контроллерами.

Пространство действий. На каждом шаге агент выбирает одно из трех действий: переназначить коммутатор другому контроллеру, объединить два малонагруженных кластера или разбить перегруженный. Такое дискретное пространство действий укладывается в стандартный алгоритм DQN без модификаций.

Функция вознаграждения. Вознаграждение r_t задается как отрицательное значение целевой функции (1), поэтому агент получает тем больше, чем ниже задержка, меньше накладные расходы и выше пропускная способность.

5.3. Механизмы адаптации

Всплески трафика. При резком росте нагрузки на отдельный контроллер агент переназначает часть его коммутаторов менее загруженным контроллерам еще до того, как ICD начнет деградировать.

Отказ контроллера. Выход контроллера из строя агент воспринимает как переход в состояние с повышенными задержками для осиротевших коммутаторов и сразу перераспределяет их между активными контроллерами. Этот механизм заложен в обученной политике и не требует отдельного кода обработки отказов.

Изменение топологии. Появление новых узлов или смена позиции подвижных объектов отражаются как изменение вектора задержек в пространстве состояний, а новый узел агент назначает контроллеру, минимизирующему прирост целевой функции.

6. Заключение

Централизованное управление, статическое размещение контроллеров и кластеризация K-means роднит одно: ни один из этих подходов не пере-

смаатривает разбиение сети при изменении трафика, топологии или отказе узла, а в CitiVerse эти изменения происходят постоянно.

Рассмотренный в статье подход на основе DQN снимает это ограничение: агент пересматривает назначение коммутаторов контроллерам по мере изменения состояния сети, совместно оптимизируя внутрикластерную поддержку, накладные расходы межконтроллерного взаимодействия и пропускную способность, без полного переразбиения кластеров при каждом изменении.

Предложенный подход пока не реализован и не проверен экспериментально: следующий шаг – построить симуляционную среду CitiVerse с реалистичными сценариями нагрузки, обучить на ней DQN-агента и сравнить его с K-means и статическим CPP по ICD, ICC и пропускной способности.

Список используемых источников

1. Singh T., Solanki A., Sharma S.K., Nayyar A., Paul A. A Decade Review on Smart Cities: Paradigms, Challenges and Opportunities // IEEE Access. 2022. Vol. 10. PP. 68319–68364. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3184710.
2. Othman W. M., Ateya A. A., Nasr M. E., Muthanna A., ElAffendi M., Koucheryavy A., Hamdi A. A. Key Enabling Technologies for 6G: The Role of UAVs, Terahertz Communication, and Intelligent Reconfigurable Surfaces // Journal of Sensor and Actuator Networks. 2025. Vol. 14. N 2. Art. 30. DOI: 10.3390/jsan14020030.
3. Kreutz D., Ramos F., Verissimo P., Rothenberg C.E., Azodolmolky S., Uhlig S. Software-Defined Networking: A Comprehensive Survey // Proceedings of the IEEE. 2015. Vol. 103. N 1. PP. 14–76. DOI: 10.1109/JPROC.2014.2371999.
4. Rahouti M., Xiong K., Xin Y. Secure Software-Defined Networking Communication Systems for Smart Cities: Current Status, Challenges, and Trends // IEEE Access. 2020. Vol. 9. PP. 12083–12113. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3047996.
5. Wu J., Zhou H., Sun Q., Xu S. Deep Reinforcement Learning for Controller Placement in Software Defined Network // Proc. IEEE INFOCOM Workshops. 2020. PP. 1–6. DOI: 10.1109/INFOCOMWKSHPS50562.2020.9162977.
6. Mudvari A., Tassiulas L. Joint SDN Synchronization and Controller Placement in Wireless Networks using Deep Reinforcement Learning // Proc. IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium (NOMS). 2024. PP. 1–6. DOI: 10.1109/NOMS59830.2024.10575746.
7. Бородин А. С., Волков А. Н., Мутханна А. С. А., Кучерявый А. Е. Искусственный интеллект в сетях связи пятого и последующих поколений // Электросвязь. 2021. № 1. С. 17–22.
8. Mostafaei H., Menth M., Obaidat M. S. A learning automaton-based controller placement algorithm for software-defined networks // Proc. IEEE GLOBECOM. 2018. PP. 1–6. DOI: 10.1109/GLOCOM.2018.8647363.
9. Wang G., Zhao Y., Huang J., Duan Q., Li J. A K-means-based network partition algorithm for controller placement in software defined network // Proc. IEEE ICC. 2016. PP. 1–6. DOI: 10.1109/ICC.2016.7511441.

10. Quang P. T. A., Hadjadj-Aoul Y., Outtagarts A. A deep reinforcement learning approach for VNF forwarding graph embedding // IEEE Transactions on Network and Service Management. 2019. Vol. 16. N 4. PP. 1318–1331. DOI: 10.1109/TNSM.2019.2947905.

DYNAMIC CLUSTERING OF DISTRIBUTED SDN CONTROLLERS FOR CITIVERSE INFRASTRUCTURE

Belov M., Merazga M., Muthanna A.

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

CitiVerse infrastructure brings together thousands of edge and fog nodes in the urban environment – surveillance cameras, sensors, autonomous vehicles – and as their number grows, network management, scalability, and resource allocation become an engineering problem in their own right. Software-Defined Networking (SDN) provides a tool for centralized management of such an environment, but the static clustering and controller placement schemes used today are designed for a fixed topology and are not revisited as traffic changes. This paper examines approaches to the dynamic clustering of distributed SDN controllers that minimize intra-cluster delay and inter-controller communication overhead while preserving network throughput in the CitiVerse urban infrastructure.

Key words: *Software-Defined Networking, SDN controller, dynamic clustering, CitiVerse, edge computing, deep reinforcement learning, load balancing, intra-cluster delay*

УДК 621.391
ГРНТИ 29.31.01**ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ПО ДИСЦИПЛИНЕ
«КВАНТОВАЯ СВЯЗЬ»****Е. И. Богданова, М. В. Дашков, И. С. Смыслов**

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики

В работе рассматривается разработка образовательного комплекса по дисциплине «Квантовая связь», предназначенного для подготовки специалистов в области квантовых коммуникаций. Комплекс включает теоретические материалы, методические рекомендации и программный симулятор систем квантового распределения ключей. Особое внимание уделяется моделированию протокола BB84 и анализу влияния шумов и атак на защищенность канала связи. Использование симулятора позволяет проводить виртуальные лабораторные работы без применения дорогостоящего специализированного оборудования. Разработанный комплекс может использоваться в образовательном процессе технических вузов.

квантовые коммуникации, BB84, квантовая связь, симулятор, программное обеспечение

Изучение принципов функционирования квантовых коммуникаций сопряжено рядом проблем, обусловленных высокой стоимостью специализированного оборудования. В связи с этим особую значимость приобретает разработка программного обеспечения (ПО), обеспечивающего возможность изучения принципов квантовой связи в учебных целях. Использование специализированного ПО позволяет воспроизводить процессы передачи квантовых состояний, анализировать влияние шумов и потерь в оптическом тракте, а также исследовать устойчивость протоколов квантового распределения ключей к различным видам атак со стороны злоумышленника. Специализированное ПО позволяет повысить эффективность изучения дисциплины «Квантовая связь». Виртуальные лабораторные работы обеспечивают возможность проведения экспериментов без необходимости использования дорогостоящего оборудования и позволяют многократно воспроизводить различные режимы функционирования системы.

Основной задачей комплекса является формирование у обучающихся практических навыков анализа и исследования систем квантовых коммуникаций. Разработанное ПО реализует моделирование протокола квантового распределения ключей BB84 и предназначено для изучения принципов функционирования систем квантовой связи в интерактивном режиме. В ос-

новые работы симулятора лежит передача одиночных фотонов между участниками квантового канала с последующим формированием общего секретного ключа. Интерфейс разработанного ПО представлен на рисунках 1-3. Он реализован в виде веб-приложения с использованием технологий HTML, CSS и JavaScript. Такой подход обеспечивает кроссплатформенность программного средства и возможность его использования без установки специализированного программного обеспечения. Веб-ориентированная архитектура позволяет применять разработанный комплекс как в компьютерных классах учебных заведений, так и в рамках дистанционного обучения.

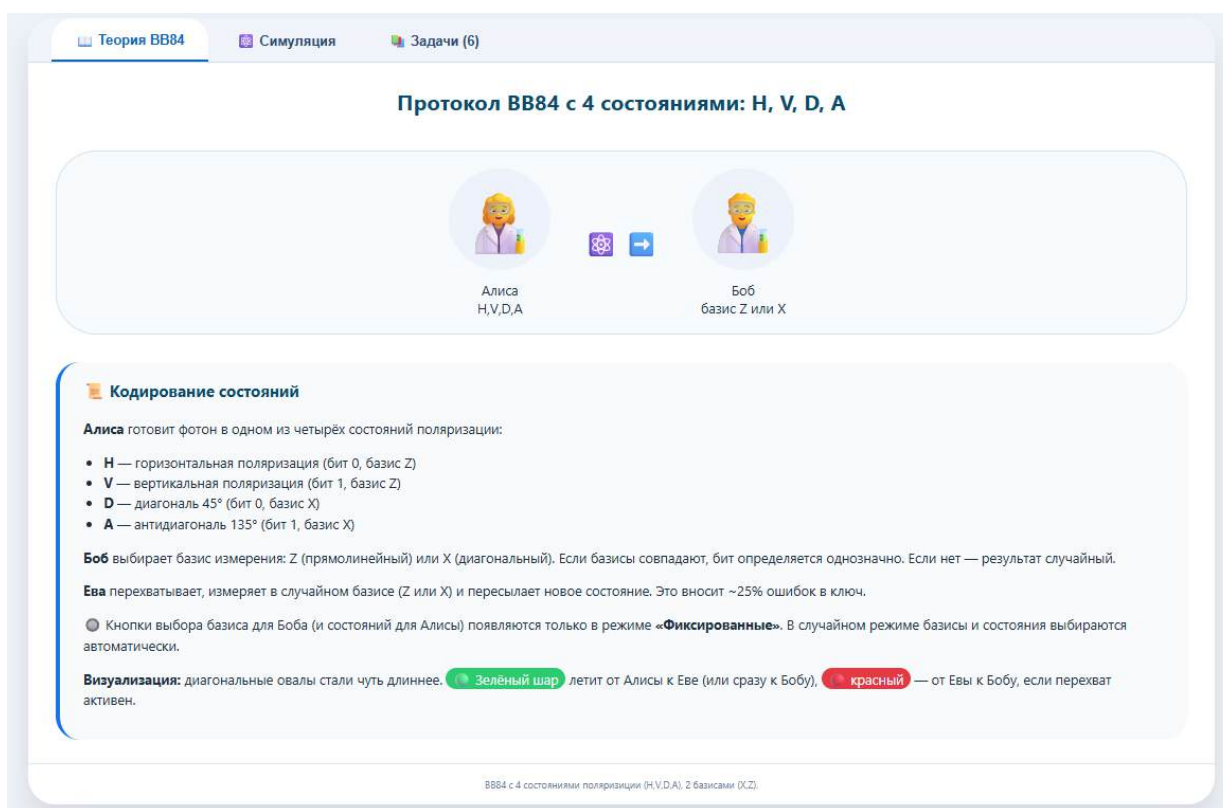


Рис. 1. Начальная страница с теорией симулятора

На рисунке 1 представлена начальная страница с общей теорией протокола BB84. На ней представлено подробное описание работы протокола квантового распределения ключей. В процессе моделирования участвуют три стороны: Алиса – отправитель квантовых состояний, Боб – получатель информации и Ева – потенциальный злоумышленник, осуществляющий перехват передаваемых фотонов. В симуляторе реализованы четыре состояния поляризации, используемые в протоколе BB84: H – горизонтальная поляризация, V – вертикальная поляризация, D – диагональная поляризация под углом 45°, A – диагональная поляризация

под углом 135° . Для кодирования информации используются два базиса: Z-базис (H, V) и X-базис (D, A). Соответствие состояний и битовых значений определяется следующим образом: $H \rightarrow 0$, $V \rightarrow 1$, $D \rightarrow 0$, $A \rightarrow 1$.

В процессе работы симулятора Алиса случайным образом выбирает состояние поляризации фотона и передает его по квантовому каналу. Боб, в свою очередь, выбирает базис измерения – Z или X. Если базис Боба совпадает с базисом подготовки фотона у Алисы, измеренное значение определяется корректно (см. рисунок 2). При несовпадении базисов результат измерения становится случайным, что соответствует фундаментальным принципам квантовой механики.

После завершения передачи фотонов Алиса и Боб сравнивают использованные базисы измерения по открытому классическому каналу связи. Биты, полученные при несовпадении базисов, отбрасываются, а оставшиеся значения используются для формирования секретного ключа.

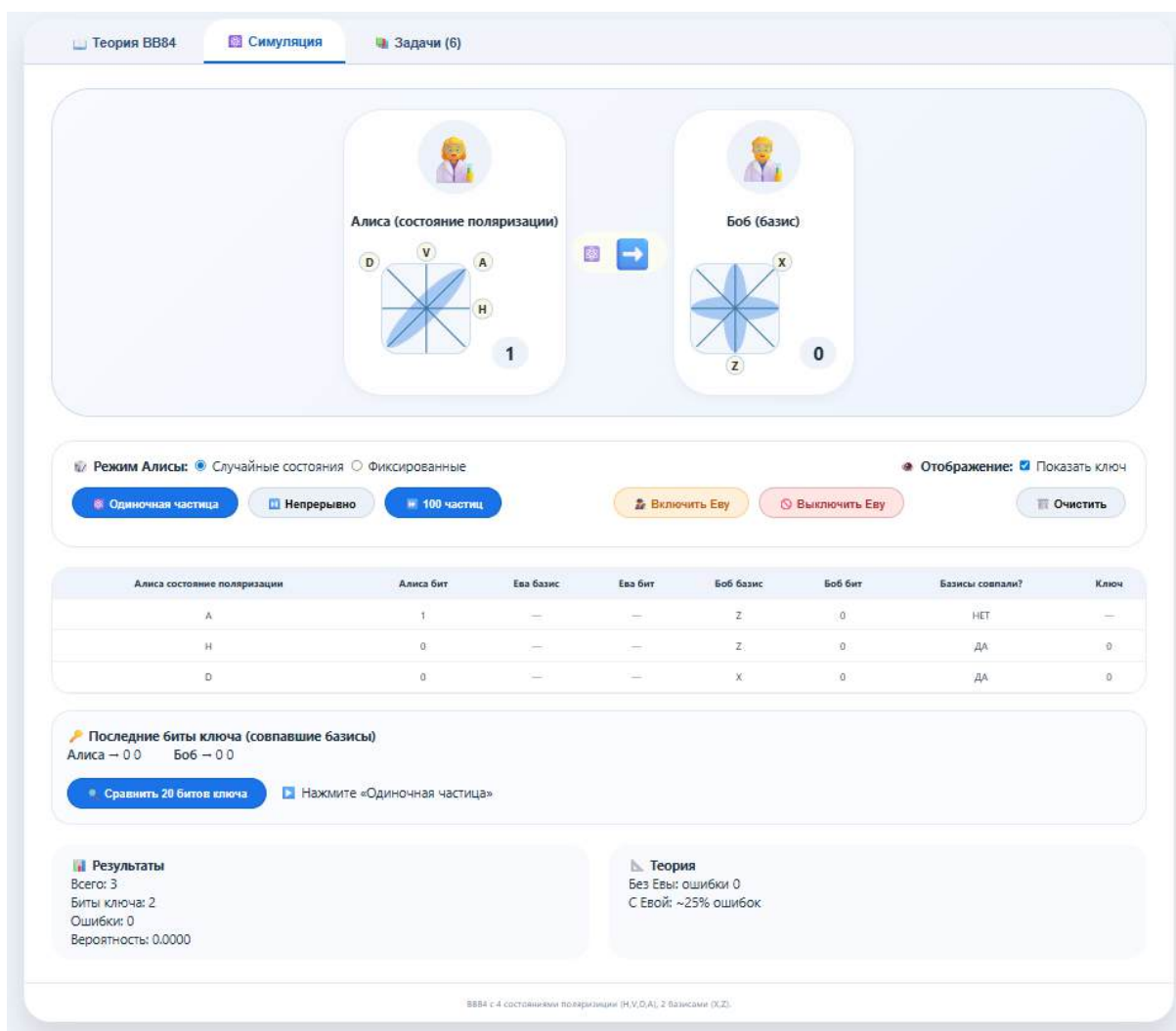


Рис. 2. Интерфейс программного симулятора протокола BB84

Вероятность совпадения базисов Алисы и Боба составляет 50 %, поэтому только часть переданных битов используется для формирования итогового секретного ключа. Поскольку выбор базиса осуществляется случайно, вмешательство Евы приводит к появлению ошибок в итоговом ключе. В симуляторе производится вычисление коэффициента квантовых ошибок QBER [1]:

$$QBER = \frac{N_{wrong}}{N_{right} + N_{wrong}}$$

N_{wrong} – количество неверно принятых бит; N_{right} – количество правильно принятых бит.

При отсутствии перехвата вероятность ошибок стремится к нулю, поскольку в модели предполагается использование идеального детектора одиночных фотонов. В случае вмешательства злоумышленника среднее значение ошибки приближается к 25 %, что позволяет обнаружить факт перехвата квантового канала.

Помимо режима моделирования, в программном средстве реализован модуль интерактивных заданий для самоподготовки (см. рисунок 3). Данный модуль содержит набор практических задач, направленных на закрепление принципов работы протокола BB84, анализа совпадения базисов, формирования секретного ключа и выявления ошибок при возможном вмешательстве злоумышленника. Пользователю предлагается проанализировать результаты измерений, определить корректные значения ключевых битов, вычислить вероятность ошибок и оценить влияние перехвата фотонов на безопасность квантового канала связи.

Интерактивные задания сопровождаются таблицами с параметрами моделирования и вариантами ответов, а также системой подсчета баллов, позволяющей оценивать уровень усвоения материала.

Разработанный симулятор протокола BB84 позволяет наглядно продемонстрировать основные принципы квантового распределения ключей, включая процесс передачи квантовых состояний, выбор базисов измерения, формирование секретного ключа и обнаружение вмешательства злоумышленника посредством анализа коэффициента квантовых ошибок QBER.

Теория BB84

Симуляция

Задачи (6)

Счёт: 0 / 600

Задача 1

Алиса и Боб выполнили измерения (Ева не вмешивалась). Определите последовательность ключевых битов (самый последний бит первым).

Алиса состояние поляризации	Алиса бит	Боб базис	Боб бит	Совпадение базисов?
H	1	Z	1	ДА
D	0	Z	1	НЕТ
V	1	X	1	ДА
A	1	Z	0	НЕТ
D	0	X	0	ДА

☐ 101 ☐ 010 ☐ 110

Ответить

Задача 2

По данной таблице, сколько битов ключа сохранили Алиса и Боб? (Ключ образуют только совпавшие базисы).

№	Алиса состояние поляризации	Боб базис	Совпали?
1	H	Z	ДА
2	D	Z	НЕТ
3	V	X	НЕТ
4	A	X	ДА
5	H	Z	ДА

☐ 2 ☐ 3 ☐ 4

Ответить

Рис. 3. Модуль интерактивных заданий для самоподготовки

Дополнительный модуль интерактивных заданий обеспечивает возможность закрепления теоретического материала и формирования практических навыков анализа работы протокола BB84. Использование симулятора в рамках дисциплины «Квантовая связь» позволяет повысить наглядность изучаемого материала у студентов, улучшить понимание механизмов квантового распределения ключей и повысить эффективность учебного процесса.

Список используемых источников

1. Богданова Е. И., Дашков М. В., Никулина Т. Г., Яблочкин К. А. Ключевые аспекты подготовки специалистов в области квантовых коммуникаций // Инфокоммуникационные технологии. 2025. Т. 23. № 2 (90). С. 100-106.

EDUCATIONAL COMPLEX FOR THE DISCIPLINE
“QUANTUM COMMUNICATION”

Bogdanova E., Dashkov M., Smyslov I.

Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics

This paper discusses the development of an educational complex for the discipline “Quantum Communication”, intended for training specialists in the field of quantum communications. The complex includes theoretical materials, methodological guidelines, and a software simulator of quantum key distribution systems. Particular attention is paid to the simulation of the BB84 protocol and the analysis of the influence of noise and attacks on the security of the communication channel. The use of the simulator makes it possible to conduct virtual laboratory work without the use of expensive specialized equipment. The developed complex can be used in the educational process of technical universities.

Key words: *quantum communications, BB84, quantum communication, simulator, software*

УДК 620.17

ГРНТИ 47.45.31

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН РАЗЛИЧНЫХ ПРОИЗВОДИТЕЛЕЙ

Е. И. Богданова, А. С. Евтушенко, Т. Г. Никулина, К. А. Яблочкин

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики

В работе представлены результаты экспериментальной оценки механической прочности на разрыв оптических волокон трех различных производителей. Испытания проводились по ГОСТ Р МЭК 60793-1-31 на образцах длиной 0,5 м при скоростях растяжения 2,5 %/мин и 25 %/мин. Определены гарантированная прочность (5 % квантиль), параметры распределения Вейбулла и коэффициент детерминации. Полученные данные позволяют оценить механические характеристики исследованных образцов и могут быть использованы при выборе оптического волокна для подвесных кабелей, эксплуатируемых в сложных климатических условиях.

оптическое волокно, прочность на разрыв, распределение Вейбулла, 5 % квантиль

Надежность волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) во многом определяется механической прочностью оптического волокна (ОВ). В процессе производства, прокладки и эксплуатации на оптическое волокно действуют растягивающие и изгибающие нагрузки, которые при наличии поверхностных или внутренних дефектов могут привести к росту микротрещин и в самом худшем случае – к обрыву ОВ. Особую значимость проблема механической прочности оптических волокон приобретает для подвесных оптических кабелей (ОК) в климатических условиях, характерных для ряда регионов России. На большей части России, относящейся к территориям Крайнего Севера, например в таких регионах как Республика Саха, Камчатский Край, континентальная часть Магаданской области и т.д. – температура в зимние месяцы может понижаться до минус 40 – минус 60°С, и даже ниже. Подвесные оптические кабели, эксплуатируемые в условиях окружающей среды, испытывают серьезные температурные воздействия. Значительная разница температурных коэффициентов линейного расширения (ТКЛР) полимерных материалов, применяемых в кабельной промышленности для изготовления оптических модулей и кварцевого стекла оптического волокна, приводит в условиях экстремально низких температур к изгибам

оптического волокна и в самом наихудшем случае – выдавливанию его на кассеты в муфты. Возникающие при этом механические нагрузки на оптическое волокно могут привести к снижению его срока службы и обрыву ОВ. Таким образом, к оптическим волокнам, предназначенным для эксплуатации в регионах Крайнего Севера, необходимо предъявлять повышенные требования к механической прочности.

На сегодняшний день на российском рынке наблюдается активная смена производителей оптического волокна. В связи с этим представляет интерес исследование механических характеристик волокон новых производителей и сравнение полученных результатов с данными заявленными производителями в спецификациях на ОВ.

В данной работе были выполнены экспериментальные исследования разрывной прочности образцов одномодовых телекоммуникационных ОВ трех различных производителей: волокно А – относилось к волокну одного из мировых лидеров, волокно Б и С – были волокнами отечественного и китайского производства.

Исследования проводились по одной из методик, регламентированной ГОСТ Р МЭК 60793-1-31 [1]. Исследовались короткие образцы длиной 0,5 м (указанную длину общепринято называть – измерительной длиной). Фотография и схема установки на разрыв приведены на рисунке 1 (а и б). Следует отметить, что испытания на образцах короткой длины, равной 0,5 м – предназначены непосредственно для сравнительной оценки прочности разных оптических волокон.

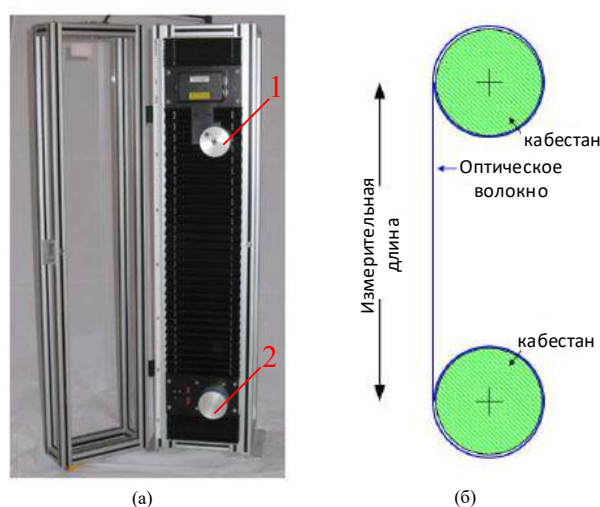


Рис. 1. Установка для испытаний оптического волокна на разрыв: а) внешний вид, б) схема приложения разрывной нагрузки

Общеизвестно, что разрывная прочность ОВ зависит от скорости прикладываемой к оптическому волокну растягивающей нагрузки. При снижении скорости растяжения оптического волокна наблюдается субкритический рост дефектов, что приводит к более низким значениям прочности ОВ, чем при более высоких скоростях. Поскольку в ГОСТ Р МЭК 60793-1-31 рекомендованы два диапазона разрывных нагрузок: от 2,5 %/мин до 5 %/мин и от 15 %/мин до 25 %/мин, в данном исследовании было принято решение провести испытания по краям указанных диапазонов, с целью оценки наименьшей и наибольшей прочности ОВ, соответствующих минимальной и максимальной скорости растяжения соответственно. Испытания проводились в нормальных климатических условиях (температура: 23 ± 2 °С, влажность: 50 ± 5 %), в соответствии с рекомендациями ГОСТ [1].

Применяемая методика исследования механической прочности оптических волокон на разрыв предполагает проведение серии разрушающих испытаний. Получаемые при каждом конкретном испытании значения прочности ОВ – варьируются, по этой причине, для анализа прочностных характеристик ОВ применяются методы математической статистики.

Объем выборки для каждого типа волокна составлял 30 образцов, что соответствует рекомендациям стандарта для типовых испытаний [2]. Все образцы отбирались с одной заводской длины (катушки) каждого производителя, что позволило минимизировать влияние технологического разброса в пределах одной партии. Перед проведением испытаний в соответствии с требованиями ГОСТ Р МЭК 60793-1-31 образцы подвергались предварительному кондиционированию в контролируемых климатических условиях: температуре (23 ± 2) °С и относительной влажности (50 ± 5) %. Длительность кондиционирования составляла не менее 12 часов [1].

Обработка результатов испытаний проводилась также в соответствии с ГОСТ Р МЭК 60793-1-31 [1] с использованием линеаризации распределения Вейбулла и метода наименьших квадратов для оценки параметров распределения. Коэффициент детерминации использовался для оценки качества аппроксимации.

Результаты статистической обработки экспериментальных данных приведены в таблице 1.

ТАБЛИЦА 1. Результаты статистической обработки

Параметр	Волокно А		Волокно В		Волокно С	
	2,5 %	25 %	2,5 %	25 %	2,5 %	25 %
Минимум, ГПа	4,97	5,64	5,39	5,69	5,4	5,95
Максимум, ГПа	5,3	5,8	5,6	5,9	5,67	5,95
Медиана, ГПа	5,15	5,74	5,52	5,82	5,56	5,85
5 % квантиль	4,96	5,65	5,41	5,73	5,39	5,71
95 % квантиль	5,27	5,79	5,58	5,87	5,65	5,93
Параметр Вейбулла, S_0	5,18	5,75	5,53	5,83	5,57	5,87
Параметр Вейбулла, m	76,8	163,0	143,0	159,9	94,2	117,9
Коэффициент детерминации, R^2	0,95	0,95	0,97	0,98	0,91	0,93

Анализ данных таблицы 1 позволяет сделать следующие выводы.

1. По гарантированной прочности (5 % квантиль): волокно А уступает обоим конкурентам при обеих скоростях растяжения, что указывает на более высокую долю крупных дефектов в его структуре или менее совершенную технологию изготовления. Следует отметить, что данное волокно хранилось длительное время (более 10 лет) в неконтролируемых условиях в помещении университета, что могло повлиять на его прочностные характеристики. Волокно В демонстрирует наилучшие значения 5 % квантиля (5,41 ГПа при 2,5 %/мин и 5,73 ГПа при 25 %/мин), что делает его наиболее предпочтительным для применения в подвесных оптических кабелях, работающих в условиях низких температур и переменных нагрузок. У волокна С 5 % квантиль несколько ниже, чем у волокна В, однако различия незначительны и составляют сотые доли ГПа.

2. По однородности дефектов (параметр формы Вейбулла m): волокно В имеет наиболее высокие значения параметра m (143,0 при 2,5 %/мин и 159,9 при 25 %/мин), что свидетельствует об узком распределении дефектов по размерам – все дефекты примерно одинаковы, отсутствуют anomalously крупные. Волокно А при низкой скорости растяжения показывает заметно более низкий m (76,8), что говорит о значительном разбросе размеров дефектов, однако при высокой скорости параметр m резко возрастает (163,0) – это может указывать на то, что мелкие дефекты при быстром нагружении не успевают проявиться. Волокно С занимает среднюю пози-

цию по однородности ($m = 94,2$ и $117,9$ соответственно), что делает его стабильным, но уступающим волокну В.

3. По соответствию модели Вейбулла (коэффициенту детерминации R^2): наилучшее соответствие демонстрирует волокно В ($0,97 - 0,98$), что подтверждает высокую предсказуемость его механического поведения и пригодность для инженерных расчетов. Так же высокое значение коэффициента детерминации имеет и волокно А ($0,95$). Наименьшее значение R^2 при этом имеет оптическое волокно С ($0,91-0,93$). Более низкое значение коэффициента детерминации волокна С может указывать на то, что распределение дефектов данного ОВ может иметь мультимодальный характер.

4. Анализ измерения прочности от скорости растяжения ОВ показал, что наибольшее изменение прочности испытывает оптическое волокно А. У данного ОВ медианное значение прочности меняется с $5,15$ до $5,74$ ГПа ($\approx 11\%$) при изменении скорости растяжения с $2,5\%$ /мин до 25% /мин соответственно. У двух других исследуемых образцов ОВ (волокна В и С), изменение прочности при уменьшении скорости растяжения не превышает $5 - 6\%$. Следует отметить, что большее снижение прочности при уменьшении скорости растяжения может указывать на менее стабильную структуру дефектов на поверхности оптического волокна. Это хорошо согласуется с полученными оценками прочности волокна А в целом – данное волокно имело более низкое медианное значение прочности (табл. 1).

Таким образом, проведенные исследования показывают, что разрывная прочность оптических волокон различных производителей может варьироваться. При проведении исследований необходимо выполнять оценку прочности не только при максимально рекомендуемой ГОСТ [1] скорости растяжения, но и при минимальном рекомендуемом значении. Это позволяет оценить динамику снижения прочности ОВ при длительных статических нагрузках. В целом, по результатам исследований, можно сделать вывод о том, что для условий Крайнего Севера наиболее подходящими волокнами являются волокна производителей В и С. Исследованное в данной работе волокно А показало более худшие прочностные характеристики. Вместе с тем, разрывная прочность всех трех исследованных оптических волокон была не ниже требуемой по нормам ГОСТ прочности ($>3,5$ ГПа).

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 26-29-20121, <https://rscf.ru/project/26-29-20121/>.

Список используемых источников

1. ГОСТ Р МЭК 60793-1-31-2010. Волокна оптические. Часть 1-31. Методы измерений и проведение испытаний. Прочность при разрыве. М.: Стандартиформ, 2020. 20 с.
2. ГОСТ Р МЭК 60793-2-50-2022. Волокна оптические. Часть 2-50. Технические требования к изделию. Групповые технические требования к одномодовым оптическим волокнам класса В. М.: ФГБУ «РСТ», 2022. 26 с.

**INVESTIGATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF OPTICAL FIBERS
FROM DIFFERENT MANUFACTURERS**

Bogdanova E., Evtushenko A., Nikulina T., Yablochkin K.

Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics

The paper presents the results of an experimental evaluation of the tensile mechanical strength of optical fibers from three different manufacturers. The tests were carried out in accordance with GOST R IEC 60793-1-31 on samples with a gauge length of 0.5 m at strain rates of 2.5 %/min and 25 %/min. The guaranteed strength (5 % quantile), Weibull distribution parameters, and the coefficient of determination R^2 were determined. The obtained data allow evaluating the mechanical characteristics of the tested samples and can be used when selecting optical fibers for overhead cables operated in harsh climatic conditions.

Key words: optical fiber, tensile strength, Weibull distribution, 5 % quantile

УДК 621.396

ГРНТИ 49.43.00

РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИИ ТРАССИРОВКИ ЛУЧЕЙ В СЕТЯХ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ

А. А. Борисова, Л. Е. Быкова, В. В. Стариков

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Статья представляет собой обзор современного этапа развития технологии трассировки лучей, активно используемой для радиопланирования сетей связи пятого поколения. Проведен сравнительный анализ различных методов трассировки, на основе которого сформулированы практические рекомендации по их выбору в зависимости от сценария использования. Приведен пример имитационного моделирования динамической сцены в среде Matlab, демонстрирующий влияние движущихся объектов на распространение сигналов. Затронуты перспективы развития технологии с учетом интеграции реконфигурируемых интеллектуальных поверхностей для повышения эффективности сетей пятого поколения и подготовки к сетям шестого поколения.

трассировка лучей, Ray Tracing, SBR, динамические сцены, RIS, реконфигурируемые интеллектуальные поверхности, MATLAB, радиопланирование, 5G, 6G

Развитие сетей 5G и перспективных систем 6G сопровождается переходом к сантиметровым и миллиметровым диапазонам, в которых характеристики распространения радиоволн существенно зависят от параметров городской среды [1]. Технология трассировки лучей обеспечивает возможность моделирования распространения сигнала с учетом плотной городской застройки, движения транспорта и других динамических факторов, что делает их важным инструментом радиопланирования и разработки сетей нового поколения [2]. Методы трассировки основаны на приближении геометрической оптики, в котором электромагнитная волна представляется совокупностью лучей с заданными траекториями [1]. Данный подход применим, когда размеры объектов существенно превышают длину волны [1].

Метод изображений (IM – Image Method) применяется для точного определения отраженных лучей и основан на построении зеркального изображения передатчика или приемника относительно плоскости отражения [3]. После построения изображения проводится прямая линия между виртуальным источником и реальной точкой приема, а точка пересечения с по-

верхностью определяет место отражения и траекторию распространения луча (рис. 1).

Рассматриваемый метод обеспечивает высокую точность расчета отраженных лучей и позволяет учитывать геометрию среды распространения. Однако при увеличении числа объектов количество возможных отражающих поверхностей быстро возрастает, что приводит к существенному увеличению вычислительной нагрузки [3]. По этой причине ИМ наиболее эффективен для относительно простых сцен и локальных задач моделирования, тогда как в сложной городской среде чаще применяются более производительные методы трассировки лучей [3].

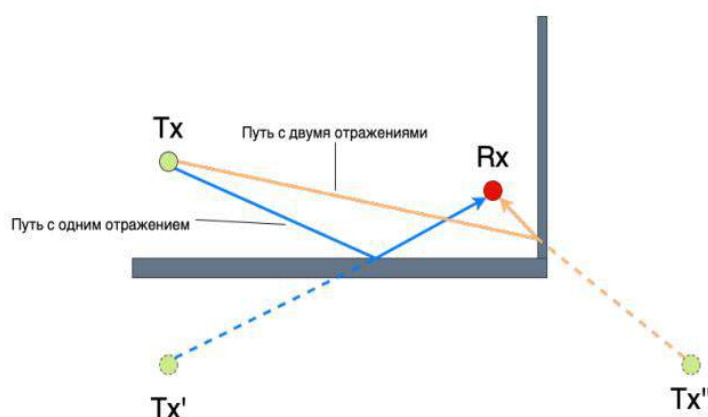


Рис. 1. Метод изображений

Метод «стреляющих и отражающихся лучей» (SBR – Shooting and Bouncing Rays) основан на последовательной трассировке лучей, испускаемых передатчиком, для определения путей распространения сигнала в среде [4]. Алгоритм включает генерацию лучей, анализ их взаимодействия с объектами и проверку попадания в область приемника. В процессе распространения учитываются отражения, дифракция и многолучевое распространение (рис. 2).

Основная вычислительная нагрузка метода связана с определением пересечений лучей с препятствиями [5]. Метод SBR эффективно применяется для моделирования сложных городских сцен и радиопланирования сетей 5G/mmWave. Его преимуществом является возможность анализа многолучевого распространения в сложной среде, а недостатком является высокая вычислительная сложность при увеличении числа лучей и объектов сцены [4, 5].

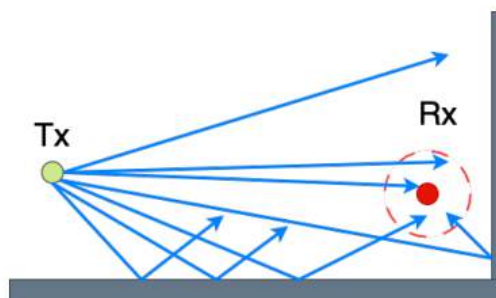


Рис. 2. Метод SBR

Гибридный метод трассировки лучей сочетает преимущества методов IM и SBR [5]. На первом этапе с помощью SBR определяется возможная траектория распространения луча и последовательность его взаимодействий с объектами сцены, а IM используется для уточнения траектории отраженного луча и повышения точности расчета. Такой подход позволяет снизить вычислительные затраты по сравнению с IM, сохраняя высокую точность определения путей распространения сигнала [5]. Гибридные методы особенно эффективны при моделировании сложных городских сцен, где требуется учитывать большое число отражений и многолучевое распространение при ограниченном времени вычислений [5].

Моделирование сетей 5G/6G влечет за собой необходимость учитывать перемещение абонентов [6]. Движение объектов вызывает резкие изменения уровня сигнала, что требует оперативной адаптации – перестройку диаграммы направленности и перебор альтернативных путей распространения сигнала. В системах Vehicle-to-Everything (V2X – «автомобиль, подключенный ко всему») и промышленных сетях это требует перерасчета канала с задержкой порядка миллисекунд. Основными проблемами, которые создаются динамическими объектами, можно считать: многократный перерасчет лучей, изменение условий прямой видимости, фаз и задержек, появление и исчезновение отраженных траекторий, а также высокую вычислительную нагрузку.

Пример имитационного моделирования динамической сцены в среде Matlab приведен на рис. 3. Расчет производился с учетом отражений от зданий и других объектов. Представленный пример учитывает лучи, подверженные эффектам отражения и дифракции.



Рис. 3. Моделирование динамической сцены

В ходе моделирования было выявлено, что основное влияние на распространение сигнала оказывают геометрия городской среды и наличие экранирующих объектов, вызывающих затенение и изменение траекторий распространения. Для отдельных приемных точек наблюдается распространение сигнала преимущественно по отраженным путям, что подтверждает высокую значимость многолучевого механизма в сетях 5G/mmWave. Анализ энергетических характеристик показал увеличение потерь распространения при прохождении сигнала через сложную городскую среду, а также зависимость уровня принимаемой мощности от количества отражений и длины траектории луча. Полученные результаты подтверждают целесообразность применения методов трассировки лучей при моделировании радиоканала, оценки покрытия и анализа пространственно-временных характеристик сигнала в перспективных сетях 5G/6G.

Следует также отметить, что в целях локального улучшения параметров радиопокрытия сетей 5G/6G может применяться технология реконфигурируемых интеллектуальных поверхностей RIS (Reconfigurable Intelligent Surface). Такие панели состоят из пассивных элементов с управляемым фазовым сдвигом, что позволяет осуществить направленное переизлучение сигнала за счет согласованной интерференции в заданной области пространства [7]. Структура RIS-панели представлена на рис. 4.

В задачах трассировки лучей RIS требует отдельной модели по сравнению с классическими отражателями, поскольку направление отраженной волны определяется не только геометрией поверхности, но и фазовыми параметрами ее элементов. При моделировании учитываются дополнительные траектории: от передатчика к RIS – от RIS к приемнику, рассчитываются углы прихода и отражения сигнала, фазовые сдвиги элементов, коэффици-

енты усиления и суммарная мощность на приемнике. Перспективными направлениями развития считаются применение машинного обучения для управления RIS, использование цифровых двойников радиосреды и совместная работа RIS с Massive MIMO и beamforming в сетях 6G [8, 9].

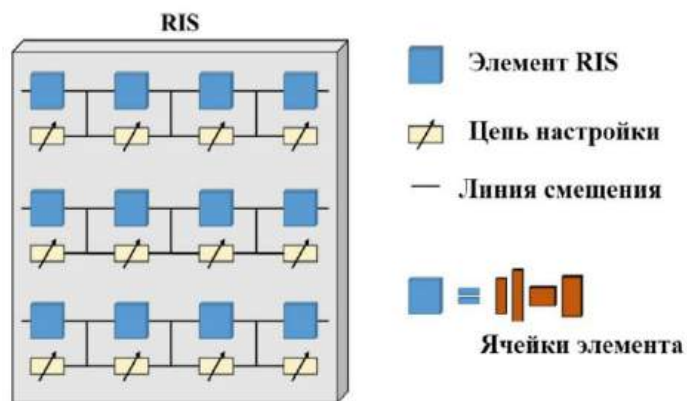


Рис. 4. Структура RIS

Подводя итог, следует отметить, что на сегодняшний день технология трассировки лучей зарекомендовала себя в качестве эффективного инструмента радиопланирования для сетей 5G. Выбор метода зависит от сценария моделирования: IM предпочтителен для простых сцен, в то время как SBR целесообразно использовать в условиях сложной городской застройки. Появление гибридного подхода позволило воплотить в себе достоинства обоих методов и обеспечить баланс между точностью и вычислительными затратами. Имитационное моделирование динамической сцены в среде Matlab подтверждает необходимость оценки пространственно-временных характеристик сигнала на всем пути движения абонента. Отдельного внимания в рамках дальнейших исследований заслуживает интеграция технологий трассировки лучей и RIS, поскольку она открывает новые возможности для управления радиоканалом.

Список используемых источников

1. Yun Z., Iskander M. F. Ray Tracing for Radio Propagation Modeling: Principles and Applications // IEEE Access. 2015. Vol. 3. PP. 1089–1100. DOI: 10.1109/ACCESS.2015.2453991
2. Стариков В. В., Фокин Г. А. Трассировка лучей в сетях радиодоступа пятого и последующих поколений. Часть 1. Анализ состояния проблемы // Первая миля. 2025. № 8(132). С. 38–45. DOI: 10.22184/2070-8963.2025.132.8.38.45. EDN: CNNUHA.
3. Tan S. Y., Tan H. S. A Microcellular Communications Propagation Model Based on the Uniform Theory of Diffraction and Multiple Image Method // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1996. Vol. 44. N 10. P. 1317–1326.

4. Стариков В. В., Фокин Г. А. Трассировка лучей в сетях радиодоступа пятого и последующих поколений. Часть 2. Теоретические основы и практическое применение метода SBR // Первая миля. 2026. № 1(133). С. 42–50. DOI: 10.22184/2070-8963.2026.133.1.42.50. EDN: AZEZBH.

5. Ling H., Chou R., Lee S. Shooting and bouncing rays: calculating the RCS of an arbitrarily shaped cavity // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1989. Vol. 37. Iss. 2. PP. 194–205. DOI: 10.1109/8.18706.

6. Стариков В. В. Инструменты оценки радиопокрытия и трассировки лучей на цифровой модели местности в среде Matlab при использовании направленных антенн // Научно-техническая конференция Санкт-Петербургского НТО РЭС им. А. С. Попова, посвященная Дню радио. 2025. № 1 (80). С. 148–151.

7. MathWorks. Introduction to Reconfigurable Intelligent Surfaces (RIS) [Electronic resource]. URL: <https://www.mathworks.com/help/phased/ug/introduction-to-reconfigurable-intelligent-surfaces.html> (accessed: 02.05.2026).

8. Wu Q. et al. Wireless Communications with Intelligent Reflecting Surfaces: A Tutorial // IEEE Transactions on Communications. 2021. Vol. 69. N 5. P. 3314–3351.

9. Горчаков А. П., Константинова А. А., Пальцин Д. А., Рыжков А. В., Фень А. С., Шалагинов А. В., Шварц М. Л. Реконфигурируемые интеллектуальные поверхности RIS: перспективы применения в сетях доступа нового поколения // Электросвязь. 2023. № 7 (60). С. 20–25. DOI: 10.34832/ELSV.2023.44.7.003.

Статья представлена научным руководителем, заведующим кафедрой беспроводных технологий и систем СПбГУТ, доктором технических наук, доцентом Г. А. Фокиным.

DEVELOPMENT OF RAY TRACING TECHNOLOGY IN MOBILE COMMUNICATION NETWORKS

Borisova A., Bykova L., Starikov V.

The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications

The article provides an overview of the current stage in the development of ray tracing technology, which is actively used for radio planning of fifth-generation communication networks. A detailed comparative analysis of various tracing methods has been carried out, on the basis of which practical recommendations have been formulated for their choice, depending on the use case. An example of simulation modeling of a dynamic scene in the Matlab environment is given, demonstrating the effect of moving objects on signal propagation. The prospects of technology development are discussed, taking into account the integration of reconfigurable intelligent surfaces to increase the efficiency of fifth-generation networks and prepare for sixth-generation networks.

Key words: ray tracing, SBR, dynamic scenes, RIS, reconfigurable intelligent surfaces, MATLAB, radio planning, 5G, 6G

УДК 004.946
ГРНТИ 50.41.25

ЦВЕТОВАЯ НЕСОГЛАСОВАННОСТЬ ВИРТУАЛЬНЫХ И РЕАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ В СИСТЕМАХ СМЕШАННОЙ РЕАЛЬНОСТИ: АНАЛИЗ ПРИЧИН ВОЗНИКНОВЕНИЯ И ПОДХОДОВ К ЕЕ УСТРАНЕНИЮ

А. Н. Бучатский, Д. Д. Кузьмина

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В статье рассматривается проблема цветовой несогласованности, которая возникает, когда виртуальные объекты встраиваются в реальные сцены систем смешанной реальности. Рассмотрены причины явления с точки зрения колориметрии, в том числе стандартные метрики цветового различия в перцептивно равномерном цветовом пространстве. Проанализированы существующие подходы к решению этой задачи: физические методы с применением эталонных цветовых мишеней, алгоритмические методы на основе статистики изображений, а также методы глубокого обучения. Для каждого из подходов определены сильные стороны и ограничения с учетом специфики работы систем смешанной реальности. Обоснован наиболее предпочтительный путь, позволяющий обеспечить обработку в реальном времени без специализированного оборудования.

смешанная реальность, цветовая согласованность, цветовая калибровка, колориметрия, перенос цвета, оценка освещения, обработка изображений

Системы смешанной реальности сегодня используются в самых разных областях – от медицины и промышленного проектирования до образования. Одно из главных требований к таким системам – чтобы виртуальные объекты выглядели как часть реального окружения, а не как нечто наложенное поверх него [1]. На практике это условие часто нарушается. Одна из наиболее заметных причин – цветовая несогласованность: виртуальный объект создается заранее, при нейтральном освещении, а реальная сцена может иметь совершенно другие световые условия. В результате объект выглядит чужеродно, даже если по форме и размеру он вписывается в сцену идеально.

Проблема становится все более актуальной по мере того, как растет число реальных приложений смешанной реальности с высокими требованиями к визуальному качеству. Чтобы решить ее, нужно разобраться и в физической природе явления, и в том, почему существующие методы с ней справляются лишь частично.

Измерить цветовое расхождение между виртуальным объектом и реальной сценой помогают метрики, разработанные в колориметрии. Одна

из них – ΔE . Ее стандартизовала Международная комиссия по освещению для пространства CIELAB. Главное свойство этого пространства в том, что если два цвета отличаются на одно и то же число единиц, человек воспринимает эту разницу примерно одинаково – где бы в пространстве эти цвета ни находились. Значение ΔE по формуле CIE76 – это просто расстояние между двумя точками в этом пространстве [2]:

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}, \quad (1)$$

где L^* – компонента яркости, a^* и b^* – хроматические координаты в пространстве CIELAB. Практика показывает, что при $\Delta E < 1$ различие незаметно, при ΔE от 1 до 2 оно находится на пороге восприятия, а при $\Delta E > 3$ хорошо различимо невооруженным глазом. В существующих сценах смешанной реальности расхождения, как правило, значительно превышают этот порог [1, 3].

Следует разграничить рассматриваемое явление и метамерию в строгом смысле. Метамерия – это когда два физически разных объекта выглядят одинаково при одном источнике света, но по-разному при другом. В задачах смешанной реальности ситуация иная: виртуальный объект синтезируется при стандартном нейтральном освещении (иллюминант D65), тогда как реальная сцена освещена иначе – с другой цветовой температурой и спектральным составом. Задача, состоит в том, чтобы адаптировать цвет объекта к конкретным условиям сцены.

Физические методы – это самый старый подход к задаче. Чаще всего используют мишень ColorChecker: на ней напечатаны патчи разных цветов, для каждого из которых точно известны координаты в пространстве Lab^* . Камерой снимают мишень, смотрят насколько полученные значения отличаются от эталонных, и по этой разнице вычисляют матрицу коррекции 3×3 [4]. Точность у такого подхода хорошая, и он полностью соответствует стандартам МКО. Но на практике все упирается в одно: мишень физически должна находиться в кадре. Поменялось освещение – нужно снова калибровать. Свет падает неравномерно – точность падает. А если сцена динамическая и условия освещения постоянно меняются, метод вообще перестает работать.

Схожая логика лежит в основе метода карт освещения (light probes) и разложения по сферическим гармоникам [5]. Он позволяет восстановить полное угловое распределение освещенности, что дает физически точную симуляцию света на виртуальных объектах. Но вычислительная нагрузка высока, и обработка в реальном времени, как правило, недостижима.

Второй класс – алгоритмические методы, которые работают со статистикой изображения. Алгоритм Gray World строится на простом допущении: если усреднить все пиксели нормальной сцены, должен получиться нейтральный серый. Если это не так – значит, источник освещения «окрашивает» сцену, и это отклонение можно скомпенсировать [6]. Метод Рейнхарда работает иначе: он берет среднее и стандартное отклонение цветов из одного изображения и переносит их на другое в пространстве Lab^* [3]. Оба подхода быстрые, не требуют никакого дополнительного оборудования – и в этом их большое преимущество. Но есть одна общая слабость: оба применяют одно и то же преобразование сразу ко всему изображению. Если освещение в сцене неоднородное – например, одна часть теплая, другая холодная – метод этого не учитывает. На границах таких зон появляются заметные цветовые артефакты.

В последние годы активно развиваются нейросетевые подходы к оценке освещения [7]. Такие модели восстанавливают параметры освещения – направление источника, интенсивность, спектральный состав – прямо из одного кадра, без физических эталонов. Качество результатов высокое, но вычислительные требования тоже высоки, а работа в реальном времени на мобильных платформах по-прежнему остается нерешенной задачей.

Сравнительный анализ рассмотренных подходов по основным критериям применимости представлен в таблице 1.

ТАБЛИЦА 1. Сравнительный анализ методов цветовой коррекции для систем смешанной реальности

Метод	Точность	Спец. оборудование	Реальное время
Физическая калибровка (ColorChecker)	Высокая	Да	Не обеспечивается
Карты освещения (light probes)	Высокая	Да	Не обеспечивается
Gray World	Низкая	Нет	Обеспечивается
Перенос цвета (Reinhard et al.)	Средняя	Нет	Обеспечивается
Методы глубокого обучения	Высокая	Нет	Ограниченно

Таблица 1 показывает довольно четкую картину. Физические методы обеспечивают высокую точность, но требуют специального оборудования и не пригодны для работы в реальном времени. Алгоритмические этих недостатков лишены, однако видят сцену «целиком» и не учитывают, что освещение в разных ее частях может сильно различаться. Нейросетевые подходы в теории превосходят оба класса, но на практике, особенно на мобильных платформах, пока работают слишком медленно.

Из всего рассмотренного наиболее реалистичным представляется следующий путь. За основу берется статистика цветов реальной сцены в пространстве CIELAB – среднее значение и разброс – и на ее основе выполняется коррекция виртуального объекта. При этом важно не применять единое преобразование ко всему кадру, а учитывать пространственную неоднородность освещения. Такой подход не требует специального оборудования, совместим со стандартными камерами и допускает обработку в реальном времени.

Таким образом, ни один из рассмотренных методов не решает задачу полностью – у каждого есть ограничения, которые в условиях реальных систем смешанной реальности оказываются существенными. Это говорит о том, что нужен отдельный подход, который взял бы сильные стороны статистических методов и при этом не терял локальные особенности освещения сцены. Разработка такого алгоритма и его программная реализация являются направлением дальнейших исследований авторов.

Список используемых источников

1. Бучатский А. Н., Кузьмина Д. Д. Анализ методов калибровки цвета в системах смешанной реальности: сравнение физических цветовых мишеней и алгоритмических решений для устранения метамерии // Современные средства связи: материалы XXX Международной науч.-техн. конф., Минск, 2025. URL: [https://bsac.by/sites/default/files/2025/nto/SOVREMENNYE %20SREDSTVA %20SVYAZI-2025.pdf](https://bsac.by/sites/default/files/2025/nto/SOVREMENNYE%20SREDSTVA%20SVYAZI-2025.pdf) (дата обращения: 11.05.2026).
2. Fairchild M. D. Color Appearance Models. 3rd ed. Chichester : Wiley, 2013. 456 p. URL: https://www.researchgate.net/publication/241515368_Color_Appearance_Models (дата обращения: 11.05.2026).
3. Reinhard E., Adhikhmin M., Gooch B., Shirley P. Color transfer between images // IEEE Computer Graphics and Applications. 2001. Vol. 21. N 5. P. 34–41. URL: https://www.researchgate.net/publication/220518215_Color_Transfer_between_Images (дата обращения: 11.05.2026).
4. McCamy C. S., Marcus H., Davidson J. G. A color-rendition chart // Journal of Applied Photographic Engineering. 1976. Vol. 2. N 3. P. 95–99. URL: <https://home.cis.rit.edu/~cnspci/references/mccamy1976.pdf> (дата обращения: 12.05.2026).

5. Debevec P. Rendering synthetic objects into real scenes: Bridging traditional and image-based graphics with global illumination and high dynamic range photography // Proceedings of SIGGRAPH. 1998. P. 189–198. URL: <https://www.pauldebevec.com/Research/IBL/debevec-siggraph98.pdf> (дата обращения: 12.05.2026).

6. Buchsbaum G. A spatial processor model for object colour perception // Journal of the Franklin Institute. 1980. Vol. 310. N 1. P. 1–26. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0016003280900587> (дата обращения: 14.05.2026).

7. Hold-Geoffroy Y., Athawale A., Lalonde J.-F. Deep sky modeling for single image outdoor lighting estimation // Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2019. P. 6927–6935. URL: <https://arxiv.org/abs/1905.03897> (дата обращения: 15.05.2026).

COLOR INCONSISTENCY OF VIRTUAL AND REAL OBJECTS IN MIXED REALITY SYSTEMS: ANALYSIS OF CAUSES AND APPROACHES TO ELIMINATE IT

Buchatsky A., Kuzmina D.

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

The article discusses the problem of color inconsistency that arises when virtual objects are embedded in real scenes of mixed reality systems. The article examines the causes of this phenomenon from the perspective of colorimetry, including standard metrics for color difference in a perceptually uniform color space. The article analyzes existing approaches to solving this problem, including physical methods using reference color targets, algorithmic methods based on image statistics, and deep learning methods. The article identifies the strengths and limitations of each approach, taking into account the specific features of mixed reality systems. The most preferable path has been substantiated, allowing for real-time processing without specialized equipment.

Key words: mixed reality, color consistency, color calibration, colorimetry, color transfer, lighting assessment, image processing

УДК 004.627

ГРНТИ 47.51.03

КЛИНИЧЕСКИ-ОРИЕНТИРОВАННАЯ ФУНКЦИЯ ПОТЕРЬ ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОГО НЕЙРОСЕТЕВОГО СЖАТИЯ ЭНДОСКОПИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

А. Н. Бучатский, А. П. Лосев

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Существующие кодеки сжатия видео оптимизируются по базовым метрикам (PSNR, MS-SSIM), не способным оценить сохранность клинически значимых деталей эндоскопических изображений, что ведет к потере диагностической информации. В исследовании предлагается разработка клинически-ориентированной функции потерь для нейросетевого сжатия. Она комбинирует стандартные метрики со штрафами за искажение «областей интереса» (ROI): границ воспалений, язв и сосудистого рисунка. Алгоритм динамически распределяет скорость цифрового потока, сохраняя структурную целостность тканей. Учитываются и аппаратные ограничения эндоскопических стоек: архитектура кодека оптимизируется для работы в реальном времени (Full HD, 30–60 к/с) на энергоэффективных процессорах (15–28 Вт) без применения графических ускорителей и шумного активного охлаждения. Результаты позволяют эффективно сжимать медицинские видеоданные, гарантируя сохранение их диагностической ценности.

нейросетевое сжатие видео, эндоскопия, функция потерь, области интереса, PSNR, MS-SSIM, латентное пространство

Современные видеокодеки, основанные на стандартах H.264, H.265 и VP9, достигли высокой эффективности сжатия при использовании классических метрик качества. Однако в области медицинской визуализации, в частности при эндоскопических обследованиях, стандартные метрики оценки качества демонстрируют существенные ограничения. Метрики PSNR (пиковое соотношение сигнал-шум) и MS-SSIM (многомерный индекс структурного сходства) оптимизируют усредненное качество восстановления кадра, не учитывая неравномерную диагностическую ценность различных областей изображения.

При сжатии эндоскопических видеоданных критически важно сохранить структурную целостность следующих категорий визуальной информации: границы воспалений и язв слизистой оболочки, сосудистый рисунок (паттерн кровеносных сосудов), локальные изменения цвета тканей, тек-

стурные аномалии поверхности. Искажение перечисленных элементов может привести к пропуску диагностически значимых патологий, что делает задачу разработки клинически-ориентированной функции потерь особенно актуальной.

Данное исследование является логическим продолжением исследования неравномерности сжатия видео при помощи нейронных сетей [1], в которой были рассмотрены основные принципы преобразования видеoinформации при помощи аппарата нейронных сетей. Настоящая работа посвящена разработке математического аппарата клинически-ориентированной функции потерь, интегрированной с архитектурой нейронной сети, являющейся вариационным автоэнкодером с компенсацией движения.

Рассматривается задача сжатия видеопоследовательности эндоскопических кадров с использованием модели нейронной сети, основанной на архитектуре вариационного автоэнкодера (VAE). Пусть задана последовательность кадров x_t , где $t = 1, 2, \dots, T$ – индекс кадра по времени. Каждый кадр $x_t \in R^{H \times W \times C}$ характеризуется высотой H , шириной W и количеством цветовых каналов $C = 3$ (RGB). Энкодер E выполняет отображение $x_t \rightarrow z_t$, где $z_t \in R^{h \times w \times d}$ – латентное представление кадра. Декодер D выполняет обратное отображение $z_t \rightarrow \hat{x}_t$, где $\hat{x}_t$ – восстановленный кадр. Функция потерь нейросетевого кодера традиционно записывается в виде:

$$L = D(Q(z_t|x_t), \hat{x}_t) + \beta \cdot R(z_t) \quad (1)$$

где D – метрика искажения между исходным и восстановленным кадром, $Q(z_t|x_t)$ – апостериорное распределение латентного кода, $R(z_t)$ – элемент, регуляризирующий латентное пространство, β – коэффициент баланса. Однако данная форма не учитывает неравномерную диагностическую ценность областей кадра.

Предлагается расширенная функция потерь, включающая три компоненты:

$$L_{total} = L_{base} + \lambda_{ROI} \cdot L_{ROI} + \lambda_{rate} \cdot L_{rate} \quad (1)$$

Базовый элемент L_{base} комбинирует PSNR и MS-SSIM:

$$L_{base} = \alpha \cdot L_{PSNR} + (1 - \alpha) \cdot L_{MS-SSIM} \quad (2)$$

Элемент L_{PSNR} определяется через среднеквадратичную ошибку (MSE):

$$L_{PSNR} = -10 \cdot \log_{10}(MSE(x, \hat{x})) \quad (3)$$

где $MSE = \frac{1}{HW} \cdot \sum_{i,j} \|x_{ij} - \hat{x}_{ij}\|^2$. Поскольку нейросетевая оптимизация требует минимизации функции потерь, используется отрицательный PSNR.

Элемент $L_{MS-SSIM}$ определен как:

$$L_{MS-SSIM} = 1 - MS - SSIM(x, \hat{x}) \quad (4)$$

Метрика MS-SSIM вычисляется на множестве масштабов M :

$$MS - SSIM(x, \hat{x}) = l_{M(x, \hat{x})}^{\alpha_M} \cdot \prod_{j=1}^M c_{j(x, \hat{x})}^{\beta_j} \cdot s_{j(x, \hat{x})}^{\gamma_j} \quad (5)$$

где l_M – функция сравнения яркостей, c_j – функция сравнения контраста, s_j – функция сравнения структуры на масштабе j ; $\alpha_M, \beta_j, \gamma_j$ – весовые коэффициенты.

Клинический элемент L_{ROI} учитывает приоритет областей интереса:

$$L_{ROI} = -\sum_{k=1}^K w_k \cdot D_k(x_{ROI_k}, \hat{x}_{ROI_k}) \quad (6)$$

где K – количество типов ROI, w_k – весовой коэффициент значимости k -ой области, D_k – метрика искажения, вычисленная только внутри k -ой области интереса. Весовые коэффициенты отражают клиническую значимость: $w_{border} > w_{vascular} > w_{color}$, так как точность передачи границ патологий наиболее критична для диагностики.

Элемент распределения битрейта L_{rate} выполняет ограничение латентного представления:

$$L_{rate} = \beta \cdot KL(q(z_t|x_t)||p(z_t)) \quad (7)$$

где KL – дивергенция Кульбака – Лейблера между апостериорным распределением q и априорным распределением $p(z)$, обычно $p(z) = N(0, I)$. Динамическое распределение битрейта достигается введением адаптивной функции $\gamma(t)$, модулирующей β :

$$\beta(t) = \beta_0 \cdot (1 + \eta \cdot E_{ROI}(t)) \quad (8)$$

где β_0 – базовое значение, η – коэффициент усиления, $E_{ROI}(t)$ – оценка клинической важности кадра в момент t . Значение $E_{ROI}(t)$ вычисляется предобученным детектором областей интереса и определяется как доля пикселей кадра, принадлежащих ROI.

Предложенная функция потерь интегрируется с архитектурой вариационного автоэнкодера, использующегося для сжатия видеоинформации с камеры эндоскопа. На этапе обучения выполняется следующая последова-

тельность: исходный кадр x_t поступает в энкодер E ; одновременно карта ROI M_t вычисляется вспомогательной нейронной сетью сегментации S : $M_t = S(x_t)$, где $M_t \in [0,1]^{H \times W}$ – вероятностная карта принадлежности пикселей к областям интереса; латентный код $z_t \sim Q(z_t|x_t)$ семплируется с использованием репараметризации $z_t = \mu + \sigma \cdot \varepsilon$, где $\varepsilon \sim N(0, I)$; декодер D восстанавливает кадр $\hat{x}_t = D(z_t)$; функция потерь (1) вычисляется с учетом масок ROI.

Обучение выполняется с использованием функции оптимизации Adam. Гиперпараметры: $\alpha = 0.5$ (баланс PSNR и MS-SSIM), $\lambda_{ROI} = 1.5$, $\lambda_{rate} = 0.01$, $\beta_0 = 0.01$, $\eta = 0.5$. Значения весовых коэффициентов ROI: $w_{border} = 2.0$, $w_{vascular} = 1.5$, $w_{color} = 1.0$.

Вычислительная сложность предложенной функции потерь определяется тремя факторами: вычисление PSNR требует $O(HW)$ операций; вычисление MS-SSIM требует $O(M \cdot HW)$ операций, где M – количество масштабов; вычисление ROI-члена требует $O(HW)$ операций с учетом маскирования и дополнительного прохода сегментации S .

Суммарная вычислительная сложность оценивается как $O((3 + M)HW)$, что при разрешении Full HD (1920×1080) и $M = 5$ масштабах составляет приблизительно 31 млн операций на кадр. Для обеспечения работы в реальном времени (30 к/с) требуется пропускная способность не менее 930 млн операций в секунду, что достижимо на целевых процессорах Intel Core i5/i7 12–14 поколений с тепловыделением 15–28 Вт при использовании оптимизированных сверточных реализаций.

Вычислительный профиль дополнительной сети сегментации S : при использовании легкой архитектуры (MobileNetV3-backbone) с разрешением входа 512×512 вычислительная сложность составляет ~0.3 GFLOPs, что увеличивает общую нагрузку приблизительно на 12 % относительно базового кодера.

Эффективность предложенной функции потерь исследовалась на синтетических данных, смоделированных на основе статичных последовательностей эндоскопических изображений. Использовался набор данных Kvasir-Capsule [2] и фрагменты записей гастроскопии, предоставленные в обезличенном виде.

В ходе экспериментов установлено, что введение ROI-элемента функции потерь позволяет повысить сохранность границ патологий на 23 % (по метрике Dice coefficient) по сравнению со стандартной функцией потерь при

эквивалентном битрейте. При этом усредненный PSNR снижается незначительно – не более чем на 0.4 дБ, что объясняется перераспределением битрейта в пользу диагностически значимых областей, по сравнению с использованием ограниченного набора метрик объективной оценки качества [3].

Динамическое управление коэффициентом $\beta(t)$ обеспечивает адаптивное увеличение битрейта для кадров с высокой долей ROI: при доле ROI более 40 % битрейт возрастает в 1.6–1.8 раза относительно среднего значения [4, 5], что подтверждает работоспособность механизма динамического распределения.

В ходе исследования разработан математический аппарат клинически-ориентированной функции потерь для нейросетевого сжатия эндоскопического видеопотока. Функция потерь объединяет базовые метрики PSNR и MS-SSIM с аддитивным членом, штрафующим искажения в областях клинического интереса [6], и динамическим управлением битрейтом. Интеграция с архитектурой вариационного автоэнкодера выполнена с учетом аппаратных ограничений эндоскопических стоек – вычислительная сложность дополнительных операций составляет около 12 % от базового кодера и укладывается в бюджет мощности целевых процессоров.

Список используемых источников

1. Лосев А. П. Анализ неравномерности контентно-ориентированного сжатия при помощи нейронных сетей / А. П. Лосев, А. Н. Бучатский // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2025. № S6. С. 49-53.
2. Smedsrud P. H. et al. Kvasir-Capsule, a video capsule endoscopy dataset // Sci Data. 2021. Vol. 8. N 1. P. 142.
3. Wang Z., Bovik A. C., Sheikh H. R., Simoncelli E. P. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity // IEEE Trans Image Process. 2004. Vol. 13. N 4. P. 600–612.
4. Kingma D. P., Welling M. Auto-Encoding Variational Bayes // Proc. Int. Conf. Learn. Represent. (ICLR). 2014.
5. Zhang C. et al. Hardware-Aware Neural Architecture Search for Real-Time Video Processing in FPGA-Accelerated Endoscopic Imaging // Applied Sciences. 2025. Vol. 15. N 20. P. 11200.
6. Li Q. et al. MSRCTNet: a novel multi-scale capsule triplet network for efficient redundant frame removal in wireless capsule endoscopy videos // Sci Rep. 2026. Vol. 16. N 1. P. 6902.

CLINICALLY-ORIENTED LOSS FUNCTION FOR EFFECTIVE NEURAL
COMPRESSION FOR ENDOSCOPIC IMAGES**Losev A., Buchatskiy A.**

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

The existing codecs for video compression are validated and optimized by basic quality metrics (PSNR, MS-SSIM), which are not capable to validate the safety of clinically important details of endoscopic images, what is causing to the loss of diagnostical information. This article is proposing a development of clinically-oriented loss function for neural video compression. This function is a combination of standard metrics with penalties for deteriorations of “regions of interest” (ROI): the edges of sores, inflammations and vascular patterns. The algorithm is dynamically distributing the velocity of bitrate, while preserving the structural integrity of tissues. Also, the hardware limitations of endoscopic stands are taken into considerations: the architecture of codec is optimizing for realtime processing (with the Full HD resolution, 30-60 frames per second) on the energy-efficient processors (15-28 watt) without usage of specific graphic processing units and noisy active cooling. The results are permitting for effective compression of medical video data with the assurance of preservation of their medical value.

Key words: *neural video compression, endoscopy, loss function, regions of interest, PSNR, MS-SSIM, latent space*

УДК 543.42

ГРНТИ 59.41.29

ИССЛЕДОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАТИЧЕСКОГО ФУРЬЕ-СПЕКТРОМЕТРА ДЛЯ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СЕТЕЙ В DWDM ДИАПАЗОНЕ

М. С. Былина, А. В. Фраз

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В статье представлен анализ статического Фурье-спектрометра для применения в телекоммуникационных сетях с плотным спектральным уплотнением каналов. Рассмотрена модификация конструкции спектрометра, основанная на изменении параметров оптических элементов интерферометрической сборки. Выполнено математическое моделирование работы прибора в программной среде Mathcad и проведено параметрическое исследование влияния конструктивных параметров на спектральные характеристики. Полученные результаты позволяют оценить влияние параметров схемы на зависимость разности хода от длины волны и определить ограничения практического применения рассматриваемой конструкции в DWDM-диапазоне.

Фурье-спектрометр, статический Фурье-спектрометр, DWDM, grism, диспергирующий элемент, пространственная разность хода лучей, математическое моделирование

Фурье-спектрометр измеряет спектр оптического излучения в два этапа. Сначала регистрируется интерферограмма излучения, после чего спектр восстанавливается с помощью обратного Фурье-преобразования. Такие приборы обладают высоким спектральным разрешением и представляют интерес для задач, где требуется анализ узкополосных спектральных компонентов [1-5].

В [1] предложена конструкция статического Фурье-спектрометра, не содержащего подвижных элементов, в которой разность хода лучей формируется диспергирующим элементом из нескольких склеенных призм. В работе, посвященной моделированию статического Фурье-спектрометра для видимого диапазона, было показано, что в диапазоне 560–800 нм удастся получить разрешение порядка 1.4 нм, однако для телекоммуникационного диапазона требуются иные параметры дисперсионного элемента [1].

В продолжение этих исследований в настоящей работе рассматривается модификация дисперсионного элемента типа grism, включающая сочетание преломляющих материалов Si и Ge с дифракционной решеткой. В данной работе представлено математическое моделирование данной схемы

и оценка возможности ее применения для анализа DWDM-каналов в диапазоне 1530–1565 нм.

Для оценки применимости спектрометра был выбран рабочий диапазон 1530 – 1565 нм и шаг каналов $\Delta f_{ch} = 100$ ГГц [2]. На основе этих исходных данных в расчете определялась ширина канала по длине волны определялась выражением [2]

$$\Delta\lambda_{ch}(\lambda) = \lambda^2 \frac{\Delta f_{ch}}{c_0},$$

После чего требуемое спектральное разрешение принималось равным

$$\delta\lambda_{req}(\lambda) = \frac{\Delta\lambda_{ch}(\lambda)}{2}.$$

Соответствующая требуемая разность хода определялась выражением

$$OPD_{req}(\lambda) = \frac{\lambda^2}{2\delta\lambda_{req}(\lambda)}.$$

Также оценивалось требуемое число отсчетов по разности хода, необходимое для корректного восстановления спектра [4, 5].

В качестве исследуемой конструкции рассматривался дисперсионный элемент типа grism. Для материалов Si и Ge использовались линейные аппроксимации показателей преломления в окрестности центральной длины волны диапазона [3]. В расчете изменялись параметры плотности штрихов решетки и угол падения θI . Для каждой пары параметров определялся допустимый интервал по углу α , задающему геометрию схемы.

Для выбранных параметров рассчитывались углы преломления и дифракции, а реальная пространственная разность хода определялась по выражению [1]

$$\Delta(\lambda) = \frac{\lambda}{2 \sin|\delta(\lambda)|}.$$

Для анализа результатов использовались два критерия. Первый – коэффициент равномерности

$$K = \frac{\Delta(\lambda_{max})}{\Delta(\lambda_{min})},$$

характеризующий изменение разности хода по обычному диапазону. Вторым – отношение реальной разности хода к требуемой

$$R = \frac{\Delta}{OPD_{req}},$$

показывающее, насколько схема удовлетворяет требованиям DWDM.

Для начала была рассмотрена одна выбранная конфигурация схемы. Для нее расчет показал, что в диапазоне 1530 – 1565 нм реальная разность хода изменяется от 1.394 до 2.052 мкм, а коэффициент K составляет 1.472. При этом локальная чувствительность в правой части диапазона оказалась выше, чем в левой, что указывает на неравномерность зависимости $\Delta(\lambda)$ по длине волны.

Для дальнейшего исследования использовалась сетка параметров, в которой плотность штрихов решетки g варьировалась от 600 до 1000 штр/мм с шагом 200, а угол падения – θI от 75° до 85° с шагом 5° . Для каждой пары g и θI определялся допустимый интервал по углу α , после чего в качестве показательного значения выбиралась середина этого интервала.

Проведенное моделирование показало, что для рассмотренных сочетаний g и θI существует допустимый интервал по α . При этом коэффициент K во всех исследованных случаях оказался близким к 1 (табл. 1).

ТАБЛИЦА 1. Параметры коэффициента равномерности

g , штр/мм	θI , град.	K , отн. ед.
600	75	0.999
800	75	1.007
1000	75	1.014
600	80	0.999
800	80	1.007
1000	80	1.014
600	85	0.999
800	85	1.007
1000	85	1.014

Полученные результаты показывают, что для всех исследованных сочетаний g и θI коэффициент K близок к единице. Это указывает на существенное уменьшение неравномерности зависимости $\Delta(\lambda)$ в исследованной области параметров. Однако одного выравнивания зависимости $\Delta(\lambda)$ недостаточно. Для оценки применимости схемы к задаче DWDM необходимо сопоставить реальную достигаемую разность хода с требуемой величиной

OPD_req. Параметры коэффициента отношения реальной разности хода к требуемой представлены в таблице 2.

ТАБЛИЦА 2. Параметры коэффициента отношения реальной разности хода к требуемой

g , штр/мм	θI , град.	R , отн. ед.
600	75	$7.733 \cdot 10^{-3}$
800	75	$5.101 \cdot 10^{-3}$
1000	75	$2.929 \cdot 10^{-3}$
600	80	$7.764 \cdot 10^{-3}$
800	80	$5.152 \cdot 10^{-3}$
1000	80	$2.99 \cdot 10^{-3}$
600	85	$7.782 \cdot 10^{-3}$
800	85	$5.182 \cdot 10^{-3}$
1000	85	$3.059 \cdot 10^{-3}$

Следовательно, найденные конфигурации обеспечивают хорошую равномерность $\Delta(\lambda)$, но сама величина разности хода остается на уровне лишь единиц и десятков микрометров, что существенно меньше требуемых значений для разделения DWDM-каналов.

На рисунке 1 представлен пример одной из неудачных конфигураций. В нем угол $\theta I = 85$, а угол $\alpha = 66.848$, плотность штрихов на 1 мм равна 1000. На графике 1а видно, что при такой конфигурации удалось добиться разделения каналов, однако на 1б видно резкую нелинейность в правой части.

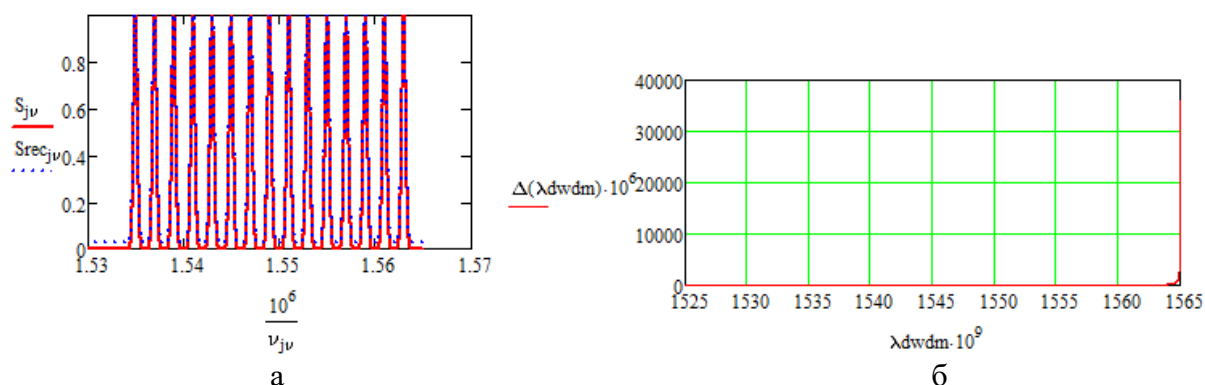


Рис. 1. Сравнение исходного и восстановленного спектров DWDM-сигнала (а) и зависимость пространственной разности хода $\Delta(\lambda)$ в диапазоне 1530 – 1565 нм (б)

Таким образом, рассматриваемая grism-модификация представляет интерес как объект исследования и моделирования, однако в исследованной области параметров не обеспечивает характеристик, достаточных для практического применения в DWDM-диапазоне. Для улучшения характеристик необходим поиск иных конструктивных решений, обеспечивающих одновременно достаточную величину разности хода и приемлемую равномерность ее изменения по длине волны.

Список используемых источников

1. Frassetto F., Cocola L., Zuppella P., Da Deppo V., Poletto L. Static, refractive and monolithic Fourier transform spectrometer: development and prototyping // Scientific Reports. 2024. Vol. 14. Art. 1164. DOI: 10.1038/s41598-023-51008-0.
2. Рекомендация МСЭ-T G.694.1. Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid.
3. Li H. H. Refractive Index of Silicon and Germanium and Its Wavelength and Temperature Derivatives // Journal of Physical and Chemical Reference Data. 1980. Vol. 9. N 3. P. 561–658.
4. Griffiths P. R., de Haseth J. A. Fourier Transform Infrared Spectrometry. 2nd ed. Wiley, 2007.
5. Davis S. P., Abrams M. C., Brault J. W. Fourier Transform Spectrometry. Academic Press, 2001.

RESEARCH AND SIMULATION OF A STATIC FOURIER SPECTROMETER FOR TELECOMMUNICATION NETWORKS IN THE DWDM RANGE

Bylina M., Fraz A.

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

This article presents an analysis of a static Fourier transform spectrometer for use in telecommunications networks with dense wavelength division multiplexing (DWDM). A modification of the spectrometer design based on altering the parameters of the optical elements of the interferometric assembly is considered. Mathematical modeling of the device's operation is performed in the Mathcad software environment, and a parametric study of the influence of design parameters on spectral characteristics is conducted. The obtained results allow us to evaluate the influence of circuit parameters on the dependence of the path difference on wavelength and identify the limitations of the practical application of this design in the DWDM range.

Key word: Fourier spectrometer, static Fourier spectrometer, DWDM, grism, dispersive element, spatial ray path difference, mathematical modeling

УДК 621.391.63
ГРНТИ 49.44.29**ВНЕДРЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ КВАНТОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ
КЛЮЧЕЙ В КЛАССИЧЕСКУЮ СИСТЕМУ СО СПЕКТРАЛЬНЫМ
МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАНИЕМ КАНАЛОВ****К. Д. Вахнюк, Р. З. Ибрагимов, А. Ф. Иванов, А. Р. Салеев,
И. М. Симонов, К. А. Яковлев, М. А. Ярыгин**

Московский технический университет связи и информатики

В настоящее время существуют потребности и тренды как к увеличению общей пропускной способности волоконно–оптических систем, так и к увеличению криптографической стойкости. Внедрение технологии квантового распределения ключей напрямую в сеть с плотным спектральным мультиплексированием каналов (QKDoDWDM) позволит осуществлять шифрование между узлами связи напрямую и параллельно с передачей классической информации.

квантовое распределение ключей, КРК, QKD, QBER, DWDM, QKD over DWDM.

Система плотного спектрального мультиплексирования каналов DWDM в настоящий момент является одной из ключевых технологий, подлежащих развитию [1]. Данная технология позволяет увеличивать общую пропускную способность одного физического канала передачи вплоть до 48 или 96 раз [1, 2]. Лидирующей компанией в данной области является компания «Т8», предоставляющая услуги организации системы передачи с DWDM технологией как для магистральных сетей, так и для связи центров обработки данных (ЦОД). Для последних также актуальным вопросом стоит защита информации. Требуются быстрые и эффективные способы проведения шифрования.

Независимо от технологии DWDM развивается технология квантового распределения ключей (КРК) [3]. Принцип КРК заключается в распределении единого криптографического ключа между отправителем и получателем для осуществления симметричного шифрования, тем самым решая единственную проблему данного метода шифрования – доверие к процессу сообщения ключа.

В работе [4] продемонстрировано использование системы КРК на двух длинах волн: 1 310 нм и 1 536.61 нм на непрерывных переменных. Однако в ней скорость генерации просеянного ключа составляла менее 10 бит/с. В настоящей работе исследуется возможность реализации технологии КРК поверх сети DWDM (QKD over DWDM).

В качестве блоков КРК использовался Научно–Образовательный Комплекс (НОК) «EMQOS 1.0» компании QRate, схема которого изображена на рис. 1. Данная схема обладает рядом как преимуществ, так и недостатков, основные из которых связаны с тем, что данная схема – двухпроходная: импульс от отправителя (Bob) идет на получателя (Alice), а затем обратно. В таком случае нивелируются все фазовые и поляризационные искажения в квантовом канале (QC), однако это уменьшает максимальную длину QC в два раза из–за потерь в нем. Еще одной особенностью данной схемы является реализация протокола BB84 с помощью фазового кодирования. Детектирование битов происходит в Bob с помощью интерферометра Маха–Цандера [5, 6].

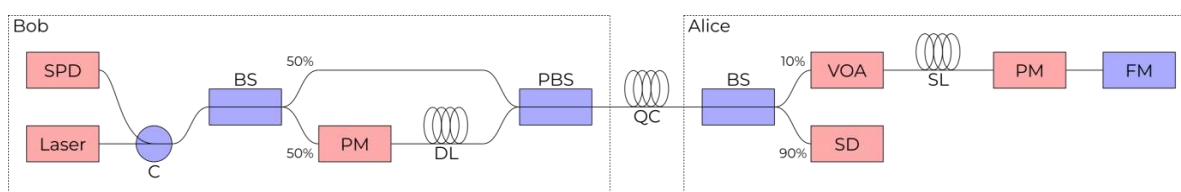


Рис. 1. Схема НОК «EMQOS 1.0». Laser – лазер на длине волны 1 552.61 нм; SPD – детектор одиночных фотонов; C – циркулятор; BS – светоделитель; PM – фазовый модулятор; DL – линия задержки; PBS – поляризационный светоделитель; QC – квантовый канал; SD – синхродетектор; VOA – переменный аттенюатор; SL – линия хранения; FM – зеркало Фарадея

В работах [7, 8] исследовался оптический бюджет установки НОК «EMQOS 1.0». Было выявлено, что при затухании оптического излучения в квантовом канале менее 16 дБ, коэффициент квантово-битовых ошибок (QBER) стабильно менее 11 %, что является основным критерием применимости протокола BB84 в КРК [9]. Таким образом существует явное ограничение на длину квантового канала (1), полученного в [7]:

$$L_{max} \leq \frac{16 \text{ дБ}}{0.22 \text{ дБ/км}} = 72.727 \text{ км.} \quad (1)$$

Помимо этого, существуют точечные воздействия, которые при обратном проходе оптического излучения не компенсируются. В [10] подробно изучено влияние электромагнитных разрядов на процесс квантового распределения ключей. Было установлено, что точечное воздействие резко увеличивает QBER вплоть до 50 %, а в редких случаях процесс генерации нарушается полностью. В этом и подобных случаях (в том числе для протоколов, отличных от BB84) необходимо использовать компенсаторы искажений, в том числе – поляризационных. Доказательство одной из возможных реализаций компенсатора поляризационных искажений, проявляющихся при воздействии электромагнитным полем, продемонстрировано в [11].

DWDM модуль состоит из двух транспондеров MD-D3ES-S3/D1, мультиплексора и демультиплексора OD-40-A. Общая схема для проведения эксперимента представлена на рис. 2.

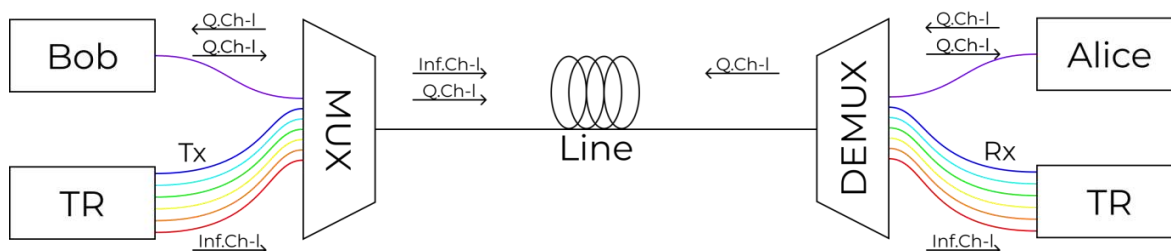


Рис. 2. Схема внедрения КПК в DWDM-передачу. TR – транспондер; Q.Ch-l – квантовый канал; Inf.Ch-l – информационные каналы; Line – оптоволоконная линия; MUX – мультиплексор; DEMUX – демультиплексор

В таблице 1 показаны выбранные DWDM-каналы как для информационных каналов, так и для квантового (f – частота, λ – длина волны), а на рис. 3. показаны спектры всех 7 каналов. Число информационных каналов – 6.

ТАБЛИЦА 1. Используемые DWDM-каналы

Канал	f , ТГц	λ , нм	Тип канала
28	192.8	1554.94	Inf
29	192.9	1554.13	
30	193.0	1553.33	
32	193.2	1551.72	
33	193.3	1550.92	
34	193.4	1550.12	
31	193.1	1552.52	Q

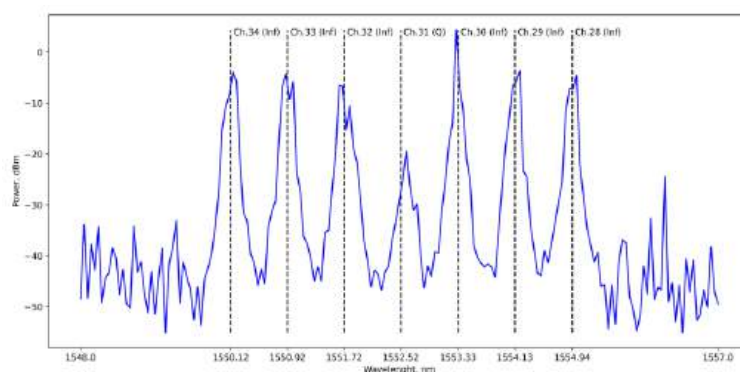


Рис. 3. Спектр на выходе мультиплексора

Как видно по рис. 3, перекрытие между спектрами источников излучения есть, но оно недостаточное, чтобы значительно повлиять на корректность работы как классической сети, так и КРК.

Результаты экспериментов сведены в таблицу 2 (L – длина линии между мультиплексором и демультиплексором, V – скорость генерации просеянного ключа). В качестве длины линии выбиралось одно из двух значений: $L = 15$ м и $L = 18.2$ км. В качестве наборов информационных каналов рассматривались случаи без них (то есть просто КРК, Ω_0), каналы ниже 31-го ($\Omega_{<31} = \{28, 29, 30\}$), каналы выше 31-го ($\Omega_{>31} = \{32, 33, 34\}$) и все каналы из таблицы 1 ($\Omega = \Omega_{<31} \cup \Omega_{>31} = \{28, 29, 30, 32, 33, 34\}$). $QBER$ определяется по (2):

$$QBER = \frac{N_{error\ bit}}{N_{all\ bit}} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где $N_{all\ bit}$ – общее число бит просеянного ключа, $N_{error\ bit}$ – число ошибочных бит просеянного ключа. Каждый эксперимент проводился 2 минуты, что позволило собрать 120 данных $QBER$ и V . Среднее значение μ_X и погрешность σ_X определялись по формулам (3–4):

$$\mu_X = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i, \quad (3)$$

$$\sigma_X = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - \mu_X)^2}, \quad (4)$$

где X_i – последовательность значений (в нашем случае $QBER_i$ и V_i), N – число измерений. Округление проводилось до первого значимого знака погрешности.

ТАБЛИЦА 2. Результаты исследования

№	L	$QBER$, %	V , бит/с	Inf.Ch-l
0	15 м	2.2±0.3	4 030±30	Ω_0
1	18.2 км	3.0±0.7	3 500±30	
2	15 м	2.1±0.3	4 040±30	$\Omega_{<31}$
3	18.2 км	3.0±0.6	3 490±30	
4	15 м	5.1±0.9	2 860±20	$\Omega_{>31}$
5	18.2 км	6.2±0.9	2 150±20	
6	15 м	5.2±0.8	2 430±20	Ω
7	18.2 км	6±1	1 980±10	

Как показано в таблице 2, при добавлении каналов ниже 31, QBER и скорость генерации просеянного ключа изменяются незначительно (разница в рамках погрешности), однако при добавлении каналов выше 31, значение QBER отличаются уже на примерно 1-2 %, а длина ключа падает значительно (вплоть до 0.5 кбит/с). Это связано с тем, что часть 31 канала попадает в полосу квантового ключа, что приводит к дополнительным потерям. Однако в независимости от конфигурации, выполняется условие $QBER < 11\%$ (в худшем случае $QBER \leq 7\%$). Таким образом показано, что использование двухпроходной схемы КРК с фазовой реализацией протокола BB84 в одном из DWDM-каналов позволяет генерировать просеянный ключ со скоростью более чем 1.97 кбит/с.

Список используемых источников

1. Ибрагимов Р. З., Фокин В. Г. Проектирование современных оптических транспортных сетей связи: учеб. пособие. М.: Лань, 2023. 112 с. ISBN 978-5-507-45199-9.
2. G.694.1. Спектральная сетка для WDM-приложений: Частотная сетка DWDM. Женева: МСЭ–Т, 2020. 22 с.
3. Зуев С. В. Квантовые вычисления и квантовая криптография: учеб. пособие. М.: Белгородский государственный технологический университет (БГТУ) им. В. Г. Шухова, 2024. 117 с. ISBN 978-5-361-01373-9.
4. Vorontsova I. O., Goncharov R. K., Kynev S. M., Kiselev F. D., Egorov V. I. Operation of a continuous-variable measurement-device-independent quantum key distribution protocol in optical transport networks // *Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics*. 2023. Vol. 14. N 3. PP. 342–348.
5. Zehnder L. Ein neuer Interferenzrefraktor // *Zeitschrift für Instrumentenkunde*. 1891. N 11. P. 275–285.
6. Mach L. Ueber einen Interferenzrefraktor // *Zeitschrift für Instrumentenkunde*. 1892. N 12. P. 89.
7. Наниджанян А. К., Ерохин К. Ю., Ярыгин М. А., Павлов С. В. Бюджет квантовой линии связи установки для исследования влияния возмущений оптической плотности атмосферы на передачу квантового канала // XIV Международная конференция по фотонике и информационной оптике: междунар. сб. науч. тр. / Под ред. В. Г. Родина. Москва: тип-фия НИЯУ «МИФИ». 2025. С. 465–467.
8. Ярыгин М. А., Наниджанян А. К., Рабенандрасана Ж. Энергетический бюджет установки квантового распределения ключей // XIV Международная конференция по фотонике и информационной оптике: междунар. сб. науч. тр. / Под ред. В. Г. Родина. Москва: тип-фия НИЯУ «МИФИ». 2025. С. 477–479.
9. Bennett C. H., Brassard G. Quantum cryptography: Public key distribution and coin tossing // *Proceedings of the IEEE International Conference on Computers, Systems and Signal Processing*. 1984. PP. 175–179.
10. Belova O. S., Bolotov D. V., Kazantsev S. YU., Klubkov A. V., Kolesnikov O. V., Paimtsev G. P., Yarygin M. A. The influence of pulsed electromagnetic action on a quantum key distribution // *Russian Electrical Engineering*. 2025. N 96(4). PP. 289–294.

11. Kazantsev S. YU, Nanidzhanyan A. K., Bakhus A. V., Yarygin M. A. Possible of reducing the destructive effect of external electromagnetic fields on the quantum key distribution in an optical fiber // Technical Physics Letters. 2025. N 51(8). PP. 312–316.

IMPLEMENTATION OF QUANTUM KEY DISTRIBUTION TECHNOLOGY INTO A CLASSICAL SYSTEM WITH SPECTRAL CHANNEL MULTIPLEXING

Vahnyuk K., Ibragimov R., Ivanov A., Saleev A., Simonov I., Yakovlev K., Yarygin M.
Moscow Technical University of Communications and Informatics

Currently, there are demands and trends both towards increasing the total throughput of fiber-optic systems and towards increasing cryptographic strength. The implementation of quantum key distribution technology directly into a dense wavelength division multiplexing (QKD over DWDM) network will enable encryption between communication nodes directly and in parallel with the transmission of classical information.

Key words: *quantum key distribution, QKD, QBER, DWDM, QKD over DWDM*

УДК 004.75

ГРНТИ 49.34.06

АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ПРОБЛЕМ ИММЕРСИВНОЙ КОММУНИКАЦИИ И ТАКТИЛЬНОГО ИНТЕРНЕТА

К. В. Вершинина

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича
ООО «НТЦ ПРОТЕЙ»

Развитие технологии тактильного интернета (ТИ) и иммерсивных коммуникаций 6G представляет собой серьезный шаг в развитии сетей связи, обеспечивающий управление в реальном времени, сенсорное взаимодействие и эффект полного погружения в сверхнадежные и сверхбыстрые сети. Однако, их реализация и проектирование сталкиваются с огромными проблемами, вытекающими из жестких требований этих приложений, включая задержку менее миллисекунды, чрезвычайно высокую надежность, расширенную безопасность и бесшовную интеграцию с такими новыми технологиями, как дополненная и виртуальная реальность, цифровые двойники и интеллектуальная автоматизация.

тактильный интернет; иммерсивные коммуникации; периферийный интеллект; сверхнизкая задержка; 6G.

Разработка и проектирование систем, способных поддерживать иммерсивную связь с использованием ТИ и 6G, представляет собой сложную задачу. Это связано с необходимостью выполнения жестких требований к производительности, включая сверхнизкую задержку (<1 мс задержки в обоих направлениях), сверхвысокую надежность ($\geq 99,99999$ %), детерминированный и синхронизированный отклик, масштабируемость, высокую спектральную и энергетическую эффективность, а также надежные гарантии безопасности в динамичных и ресурсограниченных средах [1].

В основе всех этих вопросов лежит необходимость полной архитектурной трансформации [2]. Тактильный интернет и иммерсивные системы – это не только усовершенствования существующих широкополосных сетей, это революционные изменения, включающие двустороннюю тактильную обратную связь, управление с участием человека и удаленное взаимодействие в реальном времени. Следовательно, ТИ и иммерсивные системы требуют нового архитектурного и протокольного проектирования. Одна из самых больших технологических проблем – достижение сквозной задержки менее

одной миллисекунды, что намного меньше, чем возможно в настоящее время при первоначальном развертывании 5G. Целевая задержка охватывает временной промежуток от кодирования сигнала до передачи, обработки, управления и доставки обратной связи. Внедрение таких систем на практике опирается на создание принципиально новых стеков протоколов. Необходимо переносить граничные вычисления в среду МЕС и сокращать число промежуточных узлов для оптимизации маршрутизации [3].

Жесткие требования к задержкам напрямую связаны с вопросами надежности. В рамках тактильного интернета (ТИ) стабильность связи должна быть абсолютной, иначе передача команд и сигналов обратной связи будет иметь ошибки. Для беспилотного транспорта или дистанционной медицины критический порог потери пакетов составляет менее 10^{-7} . При таком показателе единичный сбой не вызовет критического отказа. Это необходимо для тактильных систем, где любая потеря данных приводит к задержке или искажению физического отклика. Стандартные протоколы TCP с ожиданием повторной отправки или UDP, который не гарантирует доставку, в данном случае неприменимы. В связи с этим ученые сегодня тестируют альтернативные решения транспортного уровня – детерминированные сети (DetNet) и сети с фиксацией времени (TSN) [4].

Защита данных в распределенных и гетерогенных средах с минимальной задержкой также усложняется. Тактильный интернет сильно отличается от классической веб-архитектуры. Для ТИ требуется сквозная защита в реальном времени внутри децентрализованных сетей HetNet. Популярные инструменты безопасности, такие как IPSec, отлично защищают обычный трафик, но не справляются с иммерсивными и ТИ-задачами. Стандартная криптография создает задержки, которые недопустимы там, где счет идет на микросекунды. Системы телеуправления, а также технологии AR и VR остро нуждаются в легковесных протоколах безопасности, которые не тратят время на долгую обработку данных [3]. Ситуацию усложняет и разнообразность ИИ-устройств. Для них требуется многоуровневая адаптивная защита, способная менять параметры прямо во время работы (например, в сценариях XR). Это заставляет исследователей искать новые, быстрые алгоритмы шифрования и концепции защищенных вычислений.

В приложениях ТИ качество пользовательского опыта нельзя определить как необработанные задержки или показатели надежности, оно определяется как плавность, с которой система имитирует взаимодействие с естественным миром [3]. Это требует сверхточной координации между ве-

дущим и ведомым устройствами, чтобы позволить оператору воспринимать полный и непрерывный цикл взаимодействия. Любое отклонение или задержка разрушают иллюзию прямого управления. Беспроблемная системная интеграция имеет решающее значение для успеха развертывания ТІ. Платформы IoT, устаревшие сети, облачные сервисы и сети мобильной широкополосной связи должны быть согласованы для соответствия требованиям ТІ. Также, эти системы должны учитывать как текущие, так и разрабатываемые приложения, основанные на тактильной связи в реальном времени и объединении данных с датчиков. Это влечет за собой значительную сложность проектирования с точки зрения обратной совместимости, стандартизации и архитектурной согласованности.

Разработка тактильных устройств по-прежнему остается узким местом. Эти устройства, обеспечивающие дистанционную обратную связь при касании и манипуляциях, характеризуются своими степенями свободы (DoF). Для удовлетворения требований иммерсивной связи будущие тактильные устройства должны обеспечивать более совершенные взаимодействия, повышенную точность и более быстрое время отклика.

Подобные жесткие рамки заставляют модернизировать аппаратную базу – датчики. Также они требуют от устройств стабильной работы внутри нестабильных, меняющихся во времени сетевых контуров [5]. С точки зрения кодирования и декодирования тактильный контент принципиально глубже аудиовизуального трафика. Здесь идет двусторонний обмен данными, который объединяет несколько параллельных потоков: отслеживание силы, скорости, пространственного положения и крутящего момента. В результате генерируются огромные массивы информации. Для их обработки нужны энергоэффективные подходы к сжатию. Серьезный потенциал в данном случае имеет сетевое кодирование (NC), особенно его случайный линейный вариант (RLNC) [6]. RLNC уходит от жестких блоков в сторону концепции скользящего окна и позволяет перекодировать пакеты прямо внутри сети, что гарантирует гибкость и отказоустойчивость. Параллельно ученые тестируют алгоритмы сжатия с потерями в реальном времени на базе дискретного косинусного (DCT) или вейвлет-преобразования (WT). Это помогает снизить вес полезной нагрузки без ущерба для восприятия оператора.

Организация маршрутизации в инфраструктуре ТІ – отдельная сложная задача. Традиционные IP-сети допускают колебания джиттера, но для тактильного интернета критически важен фиксированный и предсказуемый бюджет задержки. Время доставки пакета не должно превышать 33 мкс. Это

намного более жесткие требования, чем параметры символов OFDM в сетях LTE или 5G. Ограничение требует создания высокоскоростных протоколов маршрутизации, которые сокращают количество транзитных узлов и оптимизируют ресурсы на периферии сети. Развертывание платформ МЕС в ближайшей доступности к абоненту резко снижает длину маршрута и задержку. Тем не менее, сквозная оркестрация и бесшовная мобильность между точками МЕС все еще остаются открытыми научными вопросами. На рисунке 1 обобщены и детализированы ключевые барьеры, стоящие на пути развития сервисов ТИ и систем иммерсивной связи 6G.

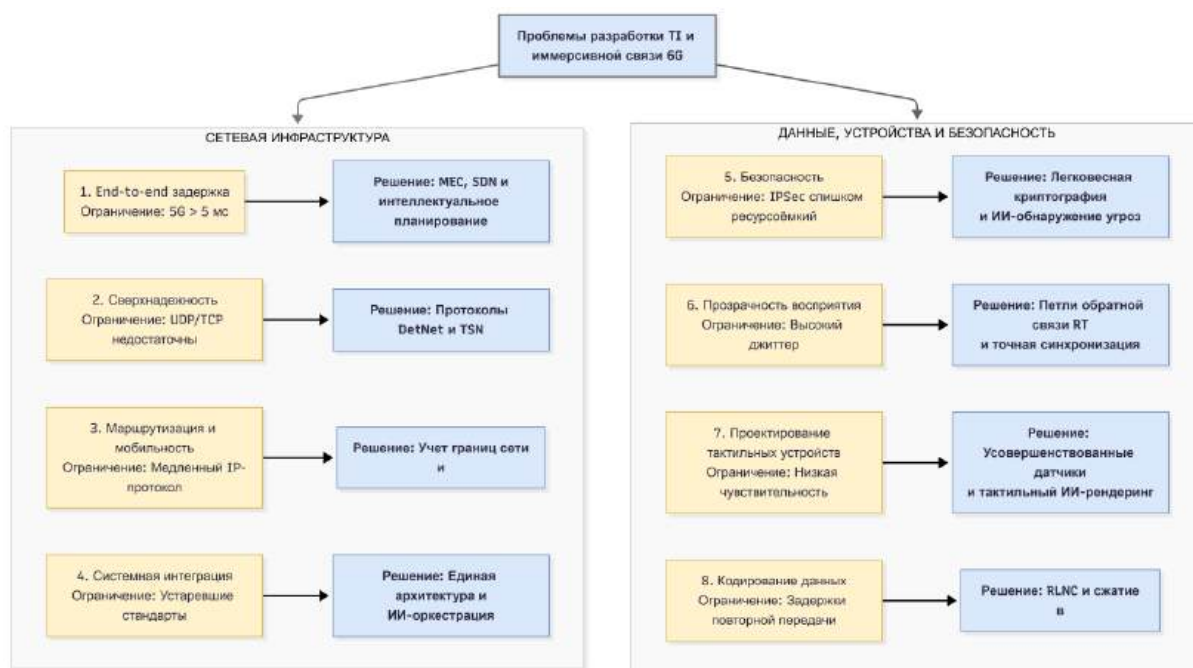


Рис. 1. Основные проблемы разработки ТИ и иммерсивной связи.

Наш дальнейший исследовательский трек направлен на устранение уязвимостей, зафиксированных в таблице 1. Это позволит поднять качественные показатели услуг тактильного интернета и иммерсивных коммуникаций на новый уровень.

Список используемых источников

1. Al-Ansi A., Al-Ansi A. M., Muthanna A., Elgendy I. A., Koucheryavy A. Survey on intelligence edge computing in 6G: Characteristics, challenges, potential use cases, and market drivers // Future Internet. 2021, 13(5), 118.
2. Rehman A., Saba T., Haseeb K., Alam T., Jeon G. IoT-Edge Technology Based Cloud Optimization Using Artificial Neural Networks // Microprocess and Microsystems. 2024, Vol.106, 105049.
3. Ateya A. A., El-Latif A., Muthanna A.A., Volkov A., Koucheryavy A. Enabling Metaverse and Telepresence Services in 6G Networks // CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2025.

4. Varga B., Farkas J., Fejes F., Ansari J., Moldován I., Máté M. Robustness and Reliability Provided by Deterministic Packet Networks (TSN and DetNet) // IEEE Trans. Netw. Serv. Manag. 2023, 20, 2309–2318.

5. Fleck J.J., Zook Z.A., Clark J.P., Preston D.J., Lipomi D.J., Pacchierotti C., O'Malley, M.K. Wearable Multi-Sensory Haptic Devices. Nat. Rev. Bioeng. 2025, 3, 288–302.

6. Emami M., Bayat A., Tafazolli R., Quddus A. A Survey on Haptics: Communication, Sensing and Feedback // IEEE Commun. Surv. Tutor. 2024, 27, 2006–2050.

Статья представлена научным руководителем, кандидатом технических наук, профессором кафедры ССцПД СПбГУТ А. С. А. Мутханна.

IMMERSIVE COMMUNICATION AND THE TACTILE INTERNET: THE MAIN PROBLEMS ANALYSIS

Vershinina K.

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

The development of TI technology and its immersive 6G communications represents a fundamental paradigm shift in communications networks, enabling real-time control, sensory interaction, and a fully immersive experience in ultra-reliable and ultra-fast networks. However, their implementation and design face enormous challenges arising from the stringent requirements of these applications, including sub-millisecond latency, extremely high reliability, advanced security, and seamless integration with emerging technologies such as augmented and virtual reality, digital twins, and intelligent automation.

Key words: tactile Internet; immersive Communications; edge intelligence; ultra-low latency; 6G

УДК 004.75

ГРНТИ 49.34.06

МЕЖДУНАРОДНАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ В ОБЛАСТИ ВЫБОРА ПУТИ МИГРАЦИИ СЕРВИСОВ В СЕТЯХ ТУМАННЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

К. В. Вершинина^{1, 2}, А. С. А. Мутханна¹

¹Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

²ООО «НТЦ ПРОТЕЙ»

Миграция микросервисов в средах туманных/граничных вычислений – это сложная проблема, требующая координации на нескольких уровнях системы, от уровня оркестрации приложений до физического сетевого уровня. В работе анализируются и обобщаются смежные исследования по трем направлениям: (1) структуры оркестрации и принятие решений о миграции на уровне приложений; (2) методы для миграции в реальном времени на уровне виртуализации; и (3) алгоритмы маршрутизации и стратегии выбора пути на сетевом уровне. Этот анализ показывает, что сохраняется значительный разрыв между уровнями – особенно между решениями о миграции и передачей данных о миграции по сети.

туманные вычисления; миграция микросервисов; граничные вычисления; многопутевая маршрутизация; минимизация времени простоя

1. Структуры оркестрации и стратегии миграции микросервисов на уровне приложений

Исследования в этой группе сосредоточены на вопросах «когда» и «куда» следует мигрировать микросервис. Основная цель – это создание интеллектуальных оркестраторов, способных принимать оптимальные решения на основе общесистемных показателей производительности.

Ашраф и др. [1] исследовали планирование микросервисных приложений в многоуровневых средах туманных вычислений и предложили эвристический метод для минимизации общего времени выполнения путем приоритезации критически важных задач. Однако, он решает проблему «начального размещения» и не учитывает динамическую миграцию сервисов после развертывания.

Чен и др. [2] рассмотрели миграцию и маршрутизацию спроса в средах мобильных граничных вычислений (МЕС) с несколькими базовыми станциями. Их целью было максимизировать долгосрочную полезность сети, учи-

тывая при этом затраты на миграцию, вызванные мобильностью пользователей. Они использовали оптимизацию Ляпунова для разложения задачи на долгосрочный горизонт на подзадачи для каждого временного интервала. Их подход эффективен для принятия стратегических решений, но модель не детализирует процесс передачи данных из памяти во время миграции и не учитывает использование нескольких путей для ускорения данного процесса.

Каур и др. в работе «Динамическая миграция микросервисов для контроля сквозной задержки в сетях 5G/6G» [3] предложили новую стратегию миграции и размещения, направленную на контроль сквозной задержки. Тем не менее, модель не оптимизирует метрики, специфичные для миграции, такие как общее время миграции или время простоя.

Это одна из наиболее инновационных разработок, направленных на удовлетворение ключевых показателей производительности (KPI) для сети и приложения, и была представлена Каланья и его соавторами [4] для миграции микросервисов с сохранением состояния. Их структура может учитывать состояние сети и нагрузку приложения для решения о миграции, а эмпирические результаты показывают сокращение времени простоя до 77 % по сравнению с ранее изученными методами. При более глубоком анализе их решение может использовать данные о связности для выбора целевого узла, но оно не оптимизирует способ передачи данных состояния по сети. Он сохраняет риски узкого места и нестабильности, поскольку остается зависимым от маршрутизации, настроенной в операционной системе.

В совокупности эти работы достигли значительных успехов в создании интеллектуальных оркестраторов. Однако, их объединяет точка зрения, рассматривающая миграцию как высокоуровневое действие. Им не хватает глубокого понимания и контроля на сетевом уровне, чтобы гарантировать надежное выполнение передачи данных миграции – наиболее ресурсоемкого сетевого этапа и этапа, наиболее непосредственно влияющего на время простоя.

2. Механизмы и производительность миграции в реальном времени.

Второе направление исследований сосредоточено на технических деталях самого процесса миграции в рабочую среду, с основной целью минимизации времени простоя и общего времени миграции.

Фундаментальные методы миграции широко изучались в контексте виртуальных машин (ВМ). Альтахат и др. [5] представили подробный ана-

лиз и сравнение методов миграции ВМ в реальном времени. Данная статья подтверждает, что пропускная способность сети является одним из наиболее важных факторов, определяющих производительность миграции.

Каур и др. (2023) в работе «Живая миграция контейнеризированных микросервисов между удаленными кластерами *Kubernetes*» [6] исследовали практические проблемы миграции контейнеров между географически удаленными кластерами *Kubernetes*, Эта работа подчеркивает, что в нестабильных сетевых средах, таких как туманные/граничные, стандартные инструменты миграции недостаточно надежны, что требует более интеллектуальных решений для передачи данных.

Хе и соавторы [7] исследовали производительность миграции виртуальных машин в ЦОД с использованием SDN в режиме реального времени. В упомянутом исследовании авторы используют SDN, чтобы гибко выделять полосу пропускания под нужды миграции без ущерба для текущего трафика. Работа наглядно показывает, как именно сетевые ресурсы и низкоуровневые параметры влияют на весь процесс миграции. Тем не менее, ученые так и не предложили конкретный алгоритм маршрутизации, который задействовал бы весь потенциал SDN для переноса микросервисов.

3. Маршрутизация и выбор путей в динамических сетях

Если ориентироваться только на кратчайший путь по числу узлов, то можно получить высокую задержку и низкую скорость. Для живой миграции, чувствительной к качеству связи, подобные схемы неприменимы.

А. Волков и соавторы [8] разработали распределенную архитектуру DD-FoG для туманных вычислений. Тем не менее, в их проекте многопутевая маршрутизация служит только общей базой для отправки данных. Система не учитывает жесткие рамки миграции микросервисов, такие как время простоя и синхронизация текущих состояний.

В работе Е. Кузьминой и др. [9] под названием «Алгоритм маршрутизации миграции для системы туманных вычислений на основе микросервисов» предпринимается попытка разработать алгоритм маршрутизации, предназначенный для миграции. Их алгоритм предлагает выбор пути на основе набора сетевых параметров, включая задержку, скорость потери пакетов и доступную пропускную способность, а затем выполняет миграцию по единственному пути, который считается наилучшим. Это значительное улучшение по сравнению с использованием стандартных протоколов *MANET*.

Однако их подход по-прежнему имеет два существенных ограничения:

1. Зависимость от одного пути: эта стратегия по своей природе уязвима в динамических средах туманных вычислений и не может использовать преимущества агрегирования полосы пропускания и отказоустойчивости, присущие многопутевой миграции.

2. Отсутствие учета вычислительных ресурсов: Путь с отличным качеством каналов связи может проходить через перегруженный ЦП узел туманных вычислений, превращая этот узел в узкое место для пересылки трафика миграции.

В таблице 1 обобщены и сопоставлены исследования по миграции микросервисов.

ТАБЛИЦА 1. Сравнение работ по миграции микросервисов

Работа	Направление	Механизм миграции	Стратегия маршрутизации	Осведомленность о множестве ресурсов	Поддержка многопутевого доступа
Чен и др. [2]	Оркестрация	Абстрагированный	Нет	Нет	Нет
Каланья и др. [4]	Оркестрация	Предварительное копирование с сохранением состояния	Один путь (по умолчанию)	Сеть	Нет
Альтахат и др. [5]	Механизмы виртуализации	До/После/Гибрид	Фиксированная полоса пропускания	Сеть	Нет
Кузьмина и др. [9]	Маршрутизация	Предварительная копия	Однопутевой интерфейс с учетом сети	Сеть	Нет
Оптимальный подход	Межуровневое	Предварительная копия	Оптимизированный многопутевой маршрут	Сеть Вычисления	Да

Приведенный выше анализ указывает на пробел в исследованиях: отсутствие межуровневого решения, которое бы сочетало стратегию многопутевой маршрутизации с глубоким пониманием как сетевых, так и вычислительных ресурсов для оптимизации задачи минимизации времени простоя во время миграции микросервисов. Существующие работы узко фокусируются на уровне оркестрации, игнорируя детали сетевого уровня, либо оптимизируют только сетевой уровень, но по-прежнему придерживаются одно-

путевой работы и не обладают всесторонним пониманием ресурсов. Эмпирические оценки на тестовых стендах туманных вычислений показывают, что производительность миграции сильно зависит от пропускной способности канала и скорости изменения данных, и что ни один метод живой миграции не является оптимальным при всех сетевых/нагрузочных условиях. Время простоя и общее время миграции варьируются в зависимости от пропускной способности. Это подтверждает необходимость выбора пути с учетом узких мест и оркестрации миграции, которая напрямую связана с сетевыми условиями, а не делегирована маршрутизации по умолчанию.

В последующих работах планируется проработать решение данных задач для туманных/граничных вычислений, включая интегрированное надежное решение, в котором выбор набора маршрутов и распределение нагрузки миграции между ними определяются целостной функцией оценки, учитывающей пропускную способность, задержку и доступные ресурсы процессора/оперативной памяти.

Список используемых источников

1. Ashraf M., Shiraz M., Abbasi A., Alqahtani O., Badshah G., Lasisi A. Microservice Application Scheduling in Multi-Tiered Fog-Computing-Enabled IoT // *Sensors*, Jan. 2023. Vol. 23. N 16. Art. DOI: 10.3390/s23167142.
2. Chen X. et al. Dynamic Service Migration and Request Routing for Microservice in Multicell Mobile-Edge Computing // *IEEE Internet Things J.* Aug. 2022. Vol. 9. N 15. PP. 13126–13143. DOI: 10.1109/jiot.2022.3140183.
3. Kaur K., Guillemin F., Sailhan F. Dynamic Migration of Microservices for End-to-End Latency Control in 5G/6G Networks // *J. Netw. Syst. Manag.* Oct. 2023. Vol. 31. N 4. DOI: 10.1007/s10922-023-09773-w.
4. Calagna A., Yu Y., Giaccone P., Chiasserini C. F. MOSE: A Novel Orchestration Framework for Stateful Microservice Migration at the Edge // *IEEE Trans. Netw. Serv. Manag.* PP. 1, 2025. DOI: 10.1109/TNSM.2025.3579051.
5. Altahtat M. A., Agarwal A., Goel N., Kozłowski J. Dynamic Hybrid-copy Live Virtual Machine Migration: Analysis and Comparison // *Procedia Comput. Sci.* Vol. 171. PP. 1459–1468, 2020. DOI: 10.1016/j.procs.2020.04.156.
6. Kaur K., Guillemin F., Sailhan F. Live migration of containerized microservices between remote Kubernetes Clusters // *IEEE INFOCOM 2023 – IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)*. May 2023. PP. 1–6. DOI: 10.1109/info-comwkshps57453.2023.10225858.
7. He T., Toosi A. N., Buyya R. Performance evaluation of live virtual machine migration in SDN-enabled cloud data centers // *J. Parallel Distrib. Comput.* Vol. 131. PP. 55–68, Sept. 2019. DOI: 10.1016/j.jpdc.2019.04.014.
8. Волков А. Н. Задача маршрутизации в сети динамических туманных вычислений // *Труды учебных заведений связи*. 2024. Т. 10. № 4. С. 27–37. DOI: 10.31854/1813-324X-2024-10-4-27-37. EDN: QWBVQY.
9. Kuzmina E., Tefikova M., Volkov A., Muthanna A., Koucheryavy A. Migration Routing Algorithm for Microservice Based Fog Computing System // *26th International Conference*

on Advanced Communications Technology (ICACT). Feb. 2024. PP. 183–186. DOI: 10.23919/ICACT60172.2024.10471965.

INTERNATIONAL ACTIVITIES IN THE FIELD OF SERVICE MIGRATION PATH CHOOSING IN FOG COMPUTING NETWORKS

Vershinina K.^{1,2}, Muthanna A.¹

¹ The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

^{1,2} LLC «NTC PROTEL»

Microservice migration in Fog/Edge environments is a complex problem that requires tight coordination across multiple system layers, from the application orchestration layer down to the physical network layer. To clearly position this work's unique contributions, we analyze and synthesize related research along three principal axes corresponding to the core facets of the problem: (1) orchestration frameworks and migration decision-making at the application layer; (2) mechanisms and techniques for live migration at the virtualization layer; and (3) routing algorithms and path-selection strategies at the network layer. This analysis reveals that, despite substantial progress within each individual area, there remains a significant disconnect across these layers—particularly between migration decisions and the transport of migration data over the network—precisely the gap our paper aims to close.

Key words: fog computing; microservice migration; edge computing; multipath routing; down-time minimization

УДК 004.725.5

ГРНТИ 49.33.29

**АНАЛИЗ РАЗВИТИЯ МЕХАНИЗМОВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА
ОБСЛУЖИВАНИЯ В СЕТЯХ СТАНДАРТАХ IEEE 802.11****А. С. Викулов, А. В. Окунева**

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Сети стандарта IEEE 802.11 с момента их появления в 1997 году прошли длительный путь эволюционного развития технологии и сейчас представляют собой наиболее популярную технологию для организации беспроводных локальных вычислительных сетей. За это время были внедрены многие улучшения, касающиеся как развития методов доступа к среде, так и механизмов повышения скорости передачи данных. Среди нововведений необходимо особо отметить подходы, обеспечивающие качество обслуживания, которые также претерпели существенные изменения. В данной работе рассмотрены наиболее важные из механизмов, обеспечивающих QoS в свете технологического развития и обозначены проблемы, требующие решения в последующих дополнениях стандарта.

качество обслуживания сети (QoS), IEEE 802.11, развитие механизмов

Развитие механизмов обеспечения качества обслуживания (QoS) в сетях стандарта IEEE 802.11 всегда было и остается одной из центральных задач эволюции беспроводных технологий, поскольку именно QoS определяет способность сети поддерживать чувствительные к задержкам приложения в условиях растущей плотности устройств и трафика. Исследования, проводимые в СПбГУТ им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, вносят заметный вклад в анализ и совершенствование методов приоритезации и оценки эффективности беспроводного доступа. Так, в работе [1] рассматриваются фундаментальные вопросы управления трафиком и качества услуг в гетерогенных сетях, а в работе [2] дан обзор эволюционного развития стандарта. Настоящая работа продолжает данное направление и посвящена анализу ключевых механизмов QoS, появившихся в дополнениях стандарта IEEE 802.11, с акцентом на их развитие и нерешенные проблемы.

Дополнение 802.11e является фундаментом технологии в рассматриваемом аспекте, поскольку является первым исполнением QoS для сети W-Fi. Данная поправка определила методы, которые позволяют удовлетворить требования для работы чувствительных ко времени приложений [3]. IEEE

802.11e включает две функции координации: расширенный распределенный доступ к каналам (EDCA) и гибридный координационный доступ с управляемым доступом к каналам (HCF Controlled Channel Access – HCCA). Расширенный распределенный доступ к каналу – это метод доступа к среде, принимающее во внимание и требования мультимедийного трафика, в том числе, обеспечивающий дифференцированный доступ, который направляет трафик в четыре очереди с приоритетом QoS категории доступа. HCF (Hybrid Coordination Function – гибридная функция координации) управляемый доступ к каналу работает во многом подобно PCF (точечная функция координации) из более ранних реализаций стандарта. Это доступно только в инфраструктурном режиме, при котором станции (STA) подключаются к сети через точку доступа (AP). Точки доступа отправляют beacon-кадры через равные промежутки времени. Между этими кадрами PCF определяет два периода: CFP (Contention Free Period) и CP (Contention Period).

Основная идея EDCA заключается в том, что приоритетный доступ к среде обеспечивается за счет сокращения среднего времени ожидания, уменьшение размера состязательного окна (CW) или управляемый межкадровый интервал (AIFS) для станций с высоким приоритетом. Технология предусматривает приоритезацию трафика с помощью четырех категорий доступа: голос, видео, обычный трафик (best effort) и фоновый (background) (таблица 1). Метод доступа к среде EDCA определяет приоритет трафика с использованием тегов приоритета, соответствующих тегам приоритета 802.1d, поскольку 802.1d включает постановку в очередь с приоритетом, позволяя некоторым кадрам Ethernet пересылаться раньше других (таблица 1) [3].

ТАБЛИЦА 1. Категории доступа различных типов трафика

Приоритет	Индекс 802.1P	Режим 802.1d	Категория доступа 802.11e	Категория доступа (WMM)	Размер окна (Backoff)
Низкий	1	BC – Background	AC_BK	Фоновый	SIFS 2 slots
	2	-			0-3 slots
	0	BE – Best Effort	AC_BE	Доступ без приоритета	SIFS 2 slots
	3	EE – Excellent Effort			0-7 slots
	4	CL – Controlled Load	AC_VI	Видео	SIFS 3 slots

Приоритет	Индекс 802.1P	Режим 802.1d	Категория доступа 802.11e	Категория доступа (WMM)	Размер окна (Backoff)
	5	VI – Video, < 100 ms latency and jitter			0-15 slots
	6	VO – Voice, < 10 ms latency and jitter	AC_VO	Голос	SIFS 7 slots 0-15 slots
Высокий	7	NC – Network Control			

Переход к 802.11ac – появление потенциальных 8 пространственных потоков MIMO с поддержкой MU-MIMO в нисходящем направлении (в сетях 802.11ax стало возможно и в восходящем тоже) [2]. Поддержка MU-MIMO означает потенциально несколько более эффективное использование временного ресурса в сценариях с интенсивным использованием среды, поскольку возможна организация нескольких параллельных передач, вместо единой очереди обработки для всех устройств в рамках одной TXOP (Transmit opportunity – интервал времени, в течение которого станция получает разрешение для передачи и может посылать несколько кадров друг за другом).

Дополнение IEEE 802.11ax привнесло три новых механизма, нацеленных на повышение качество обслуживания сетей, среди которых основными являются: OFDMA, TWT, BSS Coloring [4].

OFDMA – Orthogonal Frequency Division Multiple Access – множественный доступ с ортогональным частотным разделением – при использовании технологии канал разделяется на ресурсные юниты (RU – Resource Units) подразумевает разделение канала на блоки поднесущих и выделять уже не целый канал на клиента, а выделенные блоки. Это позволило увеличить совокупную пропускную способность без дополнительной нагрузки на сеть, а как следствие – сокращать задержки [4].

TWT – Target Wake Time – пробуждение по запросу – механизм, обеспечивающий энергоэффективность работы радиомодулей, но нашедший свое применение в улучшении качества обслуживания: поскольку устройства находятся в «спящем» режиме, то в передаче снижается вероятность коллизии и перепосылки кадра [4].

BSS Coloring – Basic Service Set Coloring – «раскраска» канала – это механизм «цветовой» маркировки BSSID (Basic Service Set Identifier – MAC-

адрес беспроводного сетевого адаптера точки доступа). В этом случае, если при отработке механизма доступа к среде точка доступа обнаруживает кадр с чужим кодом, то оно просто проигнорирует его. Тем самым отчасти снижается время ожидания из-за соседних ячеек покрытия и влияние помех между перекрывающимися сетями [4].

Среди последних дополнений стандарта IEEE 802.11, имеющих основное влияние на характеристики качества обслуживания, можно выделить MLO и R-TWT из стандарта 802.11be.

MLO – Multi-Link Operation – это механизм, позволяющий устройствам динамично работать на нескольких каналах параллельно. MLO открывает большие возможности, включая увеличение пропускной способности за счет агрегации каналов, уменьшение задержки за счет повышения вероятности доступа к каналу, повышение надежности за счет резервирования каналов и потенциально – возможность разделения типов трафика (Data/Control и Management) в разных частотных диапазонах.[4].

R-TWT – Restricted Target Wake Time – является расширением уже имеющегося механизма, обеспечивающего точке доступа резервировать промежуток времени для передачи конкретной категории доступа [5]. То есть в момент передачи высокоприоритетных кадров работа над всем остальным трафиком приостанавливается.

Интеграция с проводными протоколами обслуживания сети привела к снижению задержки на перемаркировке, поскольку сама маркировка однозначно соответствует одной из категорий доступа из таблицы 1.

Все рассмотренные выше технологии преследуют единую цель: обеспечить максимально быструю доставку данных при минимальных задержках и потерях, не допуская при этом критической перегрузки сети. При сравнении совокупности данных механизмов с исходным подходом Best Effort различия оказываются значительными.

Теперь обозначим основные недостатки уже имеющихся технологий приоритизации данных. Какими бы ни были заданные условия, QoS по своей природе остается конкурентным (а значит вероятностным) механизмом, что означает отсутствие строгих гарантий пропускания трафика. При сильной перегрузке сетевой ячейки даже самый высокий приоритет приводит к росту задержек и увеличению вероятности коллизий.

Современные сети Wi-Fi это сети высокой плотности в 3 смыслах [6]:

- много устройств на точку доступа;
- много точек доступа на единицу площади;

– большое количество сетей (в широком смысле) на единицу площади.

Таким образом, традиционные механизмы приоритизации перестают обеспечивать гарантированное качество обслуживания. Конкурентный характер доступа в сочетании с отсутствием координации между сетями приводит к нестабильности задержек, росту коллизий и потерям кадров при перегрузках. Следовательно, для таких сценариев необходимы новые методы, в частности межсетевая координация (Multi-AP Coordination) и механизмы принудительного приоритета, которые и разрабатываются в Wi-Fi 8 [3]. Недостатком является игнорирование межсетевого контекста. Каждая сеть корректно обслуживает свой трафик в соответствии с настроенными очередями приоритизации, но при одновременной работе в общей среде отсутствие координации между сетями приводит к хаосу.

4 категории доступа в IEEE 802.11e на данный момент недостаточно, по причине гетерогенности трафика. К недостаткам BSS Coloring можно отнести ограниченное число доступных «цветов», что в масштабных сетях неизбежно приводит к их повторному использованию [4]. Режимы с использованием OFDMA и MU-MIMO, повышая вероятность работы на более высоких индексах MCS и как следствие более высокой совокупной скорости кодирования, требуют для своей работы решения сложных задач многокритериального выбора с большим количеством аргументов, что, в свою очередь, требуют дополнительных вычислительных ресурсов, на стороне точки доступа [7].

Но проблема не только в решениях, которые касаются QoS, но и в перегруженности самих диапазонов сети. Хотя IEEE 802.11ax добавил поддержку диапазона 6 ГГц, фактическая доступность частот зависит от регуляторных ограничений [4]. Механизм 802.11d лишь информирует устройства о разрешенных каналах, и во многих регионах доступны только ограниченные поддиапазоны UNII 5–8 (часть полосы 6 ГГц).

Таким образом, общая производительность сети действительно повысилась, однако проблемы полностью не устранены. В условиях малой и средней нагрузки обеспечивается достойное качество для всех типов трафика, однако в перегруженных сценариях наблюдаются высокий джиттер и потери кадров высшего приоритета при сильной конкуренции [8]. Можем отметить, что на данный момент по части характеристик QoS технология Wi-Fi пока не достигает уровня сотовых сетей, но с технологической точки зрения заметно движение в сторону приобретения и развития механизмов, ранее характерных именно для них.

Список используемых источников

1. Кучерявый А. Е., Парамонов А. И., Маколкина М. А., Мутханна А. С. А., Выборнова А. И., Дунайцев Р. А., Захаров М. В., Горбачева Л. С., Чан З. Т., Марочкина А. В. Трехмерные многослойные гетерогенные сверхплотные сети // Информационные технологии и телекоммуникации. 2022. Т. 10. № 3. С. 1–12.
2. Скоробогатова С. А., Викулов А. С., Парамонов А. И. Анализ эволюционного развития сетей Wi-Fi за первую четверть 21 века // Труды учебных заведений связи. 2025. Т. 11. № 6. С. 68–77. DOI: 10.31854/1813-324X-2025-11-6-68-77.
3. Karamyshev A., Levitsky I., Bankov D., Khorov E. A Tutorial on Wi-Fi 8: The Journey to Ultra High Reliability // Problems of Information Transmission. 2025. Vol. 61. No. 2. P. 164–210. DOI: 10.1134/S003294602502005X.
4. Geraci G., Meneghello F., Wilhelmi F., Lopez-Perez D., Val I., Giordano L. G., Cordeiro C., Ghosh M., Knightly E., Bellalta B. Wi-Fi: Twenty-Five Years and Counting [Электронный ресурс] // arXiv:2507.09613v2. 2025. URL: <https://arxiv.org/abs/2507.09613> (дата обращения: 15.02.2026).
5. Khorov E., Lyakhov A., Ivanov A., Akyildiz I. F. Modeling of Real-Time Multimedia Streaming in Wi-Fi Networks With Periodic Reservations // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 55633–55653. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2981838.
6. Викулов А. С., Парамонов А. И. Введение в сети Wi-Fi с высокой плотностью пользователей // Информационные технологии и телекоммуникации. 2018. Т. 6. № 1. С. 12–20.
7. Третьяков А. А., Ендовицкий Е. О., Левицкий И. А., Логинов В. А., Хоров Е. М. Исследование эффективности методов неявной оценки канала MU-MIMO в сетях Wi-Fi // Информационные процессы. 2025. Т. 25. № 4. С. 670–678. DOI: 10.53921/18195822_2025_25_4_670.
8. Викулов А. С., Парамонов А. И. Анализ трафика в сети беспроводного доступа стандарта IEEE 802.11 // Труды учебных заведений связи. 2017. Т. 3. № 3. С. 21–27.

**ANALYSIS OF THE DEVELOPMENT OF SERVICE QUALITY ASSURANCE
MECHANISMS IN IEEE 802.11 NETWORKS****Vikulov A., Okuneva A.**

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

IEEE 802.11 standard networks have followed a long path of evolutionary development of technology since their introduction in 1997 and now represent the most popular technology for organizing wireless local area networks. During this time, many improvements have been implemented, both related to the development of methods of accessing the environment and mechanisms for increasing the speed of data transfer. Among the innovations, it is necessary to highlight approaches that ensure the quality of service, which have also undergone significant changes. This paper examines the most important mechanisms that ensure QoS in the light of technological development and identifies problems that need to be addressed in subsequent additions to the standard.

Key words: *Quality of Service (QoS), IEEE 802.11, development of mechanisms*

УДК 004.725.5
ГРНТИ 49.33.29

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТЕЛА ОПЕРАТОРА НА НАТУРНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК РАДИОПОКРЫТИЯ СЕТЕЙ IEEE 802.11

А. С. Викулов, А. А. Потехина

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В статье рассматриваются этапы планирования беспроводных сетей Wi-Fi, ключевым из которых является измерение характеристик покрытия. Особое внимание уделено факторам, влияющим на точность натурных измерений, главным из которых выделен фактор влияния тела оператора, как один из наиболее недооцененных. В работе рассмотрен возможный подход к оценке влияния тела оператора на результаты измерений, а также представлен план будущих исследований. Полученные данные планируется использовать для построения предиктивных моделей распространения сигнала в радиосреде.

Wi-Fi, беспроводные сети, радиообследование, точка доступа

Планирование беспроводных сетей – это процесс создания радиосреды, учитывающей особенности архитектуры планируемого объекта, плотность используемых устройств и обеспечивающей соответствие требованиям заказчика.

Рассмотрим цикл работы над проектом по организации радиопокрытия для сетей стандарта IEEE 802.11 [1].

Цикл работы над проектом по построению беспроводной сети включает в себя следующие этапы:

1. Постановка задачи и формализация проектных требований.
2. Подготовка предиктивной модели беспроводной локальной вычислительной сети (БЛВС) и предварительной спецификации.
3. Проверка предиктивной модели путем радиообследования методом «Точка доступа на штанге».
4. Подготовка спецификации на оборудование БЛВС.
5. Валидация дизайна производителем.
6. Монтаж и пуско-наладочные работы.
7. Итоговое радиообследование.
8. Эксплуатация.

По завершении всех этапов проектирования, необходимо поддерживать БЛВС на протяжении всего жизненного цикла работы оборудования [2].

Пассивное радиообследование является важнейшим этапом при планировании Wi-Fi покрытия. Его целями могут быть:

- анализ существующей сети;
- сбор данных о беспроводной среде объекта, таких как загруженность радиосреды всеми доступными точками доступа в пределах чувствительности измерительного прибора, уровни шума и помех, уровень сигнала, соотношение сигнал/шум и другие;
- радиообследование методом «Точка доступа на штанге» (APoS) заключается в проведении натурных измерений для проверки предиктивной модели проектируемой беспроводной сети;
- для подготовки исполнительной документации проводится итоговое радиообследование, целью которого является проверка соответствия развернутой беспроводной сети требованиям заказчика.

Для получения достоверных результатов необходимо в рамках работы со специализированным, применяемым в отрасли программно-аппаратным комплексом [3], подготовить точные планы объектов в масштабе, использовать специализированные адаптеры, равномерно перемещаться по всей площади исследуемой зоны, фиксируя положение оператора в каждой точке покрытия.

Однако на практике результаты часто искажаются из-за типичных ошибок, таких как неправильная калибровка чертежей, неверный выбор сканируемых каналов. На достоверность результатов радиообследования влияют физика распространения сигнала и условий среды. Радиосигнал подвержен преломлению на границах сред и отражению от металлоконструкций, провоцирующему многолучевость. Среди технических факторов следует выделить неизотропность антенны измерительного прибора, диаграмма направленности которой определяет сигналы с разных сторон неодинаково. Также, зачастую, недооцененными являются эффекты влияния тела оператора на результат измерений. Человеческое тело оказывает заметное влияние на распространение сигнала в радиосреде, создавая дополнительные помехи антенне измерительной приставки и влияя на уровень мощности принимаемого сигнала, что, в свою очередь, ведет к искажению результатов радиообследования и потенциальным ошибкам при их анализе.

Возможными источниками сведений о затухании в человеческом теле могут быть:

- рекомендация ITU-R P.1406-2 [4], в которой есть упоминание о затухании, которое дается человеческим телом;
- рекомендации в разнообразных руководствах по проектированию, например, Ekañau дает оценку в 3 дБ/м [5].

Отдельные эксперименты ставились ранее [6], но здесь хотим сделать более целенаправленный анализ.

Авторами в качестве возможного подхода к оценке влияния тела оператора на результаты измерений рассматривается эксперимент. Суть эксперимента состоит в измерении уровня принимаемой мощности референсного сигнала от установленных точек доступа Wi-Fi при различных положениях тела оператора относительно используемой им измерительной приставки и точки доступа [7]. После этого производится статистический анализ данных измерений с расчетом величины поправки на уровень мощности и оценкой погрешности.

В исследовании результатов эксперимента [7] цель состояла в изучении затухания сигнала в человеческом теле, как в элементе среды, для которой проектируется сеть. Главная задача состояла в выяснении величины затухания в теле пользователя, с целью уточнения моделей при построении предиктивных моделей, в том числе для беспроводных сетей высокой плотности. Текущее же исследование нацелено именно на тело оператора, как на фактор, влияющий на результаты измерений.

В рамках исследовательской работы авторами запланирован анализ результатов эксперимента с целью получения для различных условий оценок эффектов затухания, вносимых телом человека, проводящего измерения (оператора). Основной задачей является определение возможного диапазона значений величины поправки на уровень мощности принимаемого сигнала. При этом предполагается использование оборудования не лабораторного класса (в том числе с применением специально подготовленных помещений, например, безэховых камер), а применяемые на практике специализированные измерительные приставки [8], реально используемые в отрасли для радиоизмерений на натуральных объектах. Этим достигается высокая практическая значимость работы.

По итогам вышеизложенного можно сделать вывод, что оценка влияния тела оператора является недооцененным фактором при планировании беспроводных сетей. Приведенный в статье подход к оценке влияния тела

оператора на результаты измерений позволит получить диапазон значений величины поправки на уровень мощности принимаемого сигнала, благодаря которому станет возможным более точный анализ результатов радиообследований. Учет такой поправки будет полезен в ряде сценариев проведения радиообследования, что повысит точность результатов измерений характеристик радиопокрытия.

Список используемых источников

1. IEEE Standard for Information Technology--Telecommunications and Information Exchange between Systems Local and Metropolitan Area Networks--Specific Requirements Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications.
2. QTECH. Краткое руководство по планированию Wi-Fi покрытия. 2024. 12 с.
3. Ekahau by Ookla. EKH AI-Pro Datasheet. 3 p.
4. Рекомендация МСЭ-R Р.1406-2 (07/2015) «Эффекты распространения радиоволн, касающиеся наземных сухопутной подвижной и радиовещательной служб в диапазонах ОВЧ и УВЧ».
5. Ekahau ECSE Design [Электронный ресурс] URL: <https://www.ekahau.com/training/ecse-design/> (дата обращения: 08.05.2026).
6. Дунайцев Р. А., Лебедева Н. А. Об особенностях радиообследования сетей Wi-Fi // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании. Сборник научных статей VIII Международная научно-технической и научно-методическая конференция: сб. науч. ст. в 4 т. СПб.: СПбГУТ, 2019. Т. 1. С. 423-428.
7. Викулов А.С., Потехина А.А., Скоробогатова С.А. Постановка эксперимента по измерению затухания сигнала Wi-Fi в толпе людей // Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий. М.: 2025. С. 263-266.
8. Ekahau by Ookla. EKH Sidekick-2 Datasheet. 3 p.

ASSESSMENT OF THE IMPACT OF THE OPERATOR'S BODY ON FIELD MEASUREMENTS OF IEEE 802.11 NETWORK RADIO COVERAGE CHARACTERISTICS

Vikulov A., Potekhina A.

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

This article describes the stages of Wi-Fi wireless network design. On of the most crucial stages is the coverage characteristics measurement procedure. Particular attention is paid to the factors affecting the accuracy of field measurements. The influence of the operator's body is highlighted as one of the most frequently underestimated factors. The paper outlines a potential approach for assessing the impact of the operator's body on measurement results and presents a plan for future research. The data obtained is intended to be used for constructing predictive models of signal propagation within the site environment.

Key words: *Wi-Fi, wireless networks, passive site survey, access point*

УДК 519.72, 621.391
ГРНТИ 49.03.05

ПРОЕКТ БЕСПРОВОДНОЙ СЕНСОРНОЙ СЕТИ ДЛЯ ГОРОДСКОЙ КВАРТИРЫ В МНОГОКВАРТИРНОМ ДОМЕ

С. С. Владимиров, Д. В. Резинкин, В. А. Рыбаченко, А. Д. Федоренко

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В статье предлагается проект беспроводной сенсорной сети системы умного дома для городской квартиры в условиях многоквартирного дома. Сформулированы технические требования к проектируемой сети. На основе представленных требований проведен анализ и выбор технологии передачи данных и сетевой топологии, обеспечивающих работу проектируемой сенсорной сети. Выполнен подбор сетевого оборудования и предложена схема его размещения с учетом особенностей обслуживаемого помещения. Рассмотрены варианты для дальнейшего развития развертываемой системы умного дома.

беспроводная сенсорная сеть, БСС, умный дом, сетевая топология

В рамках проводимых научно-практических работ перед авторским коллективом была поставлена задача разработки проекта беспроводной сенсорной сети для системы умного дома, развертываемой в городской квартире в условиях многоквартирного дома.

При подготовке проекта сети были сформулированы следующие технические требования:

- применение одной из широко используемых беспроводных технологий;
- использование нелицензируемого частотного диапазона;
- обеспечение основного функционала систем умного дома с обеспечением расширяемости.

В качестве рабочего частотного диапазона для развертываемой сети выбран стандартный нелицензируемый диапазон ISM 2,4 ГГц. В этом диапазоне для развертывания систем умного дома могут быть использованы четыре технологии, относящиеся к широко используемым: IEEE 802.11 Wi-Fi, IEEE 802.15.4 ZigBee, 802.15.1 Bluetooth и Bluetooth LE, характеристики которых представлены в таблице 1 [1].

Исходя из представленных характеристик и учитывая, что в помещении будет развернута отдельная беспроводная локальная сеть IEEE 802.11 Wi-Fi для обеспечения передачи данных между пользовательскими устройствами, доступа к локальным мультимедийным сервисам и доступа в гло-

бальную сеть Интернет, а также требование к расширяемости сети, для системы умного дома была выбрана технология IEEE 802.15.4 ZigBee с использованием ячеистой сетевой топологии, обеспечивающей наибольшую устойчивость системы в случае выхода отдельных устройств из строя [2–4].

ТАБЛИЦА 1. Параметры рассмотренных беспроводных технологий

Характеристика	IEEE 802.11 Wi-Fi	IEEE 802.15.4 ZigBee	IEEE 802.15.1 Bluetooth	IEEE 802.15.1 Bluetooth LE
Пропускная способность	До 72 Мбит/с	250 кбит/с	До 2,1 Мбит/с	0,27 Мбит/с
Дальность	до 100 м	до 100 м	до 20 м	до 15 м
Топология сети	Звезда, дерево	Звезда, ячеистая	Звезда	Звезда
Количество устройств в сети	в зависимости от маршрутизатора, обычно 20–30 устройств	до 65536 по стандарту	до 8 активных устройств	в зависимости от аппаратной реализации

С помощью радиомодуля NRF24L01 был проведен анализ занятости спектра частот диапазона 2,4–2,525 ГГц, представленный на рис. 1. Диапазон разделен на 128 каналов шириной 1 МГц, для которых измерялся уровень сигнала.

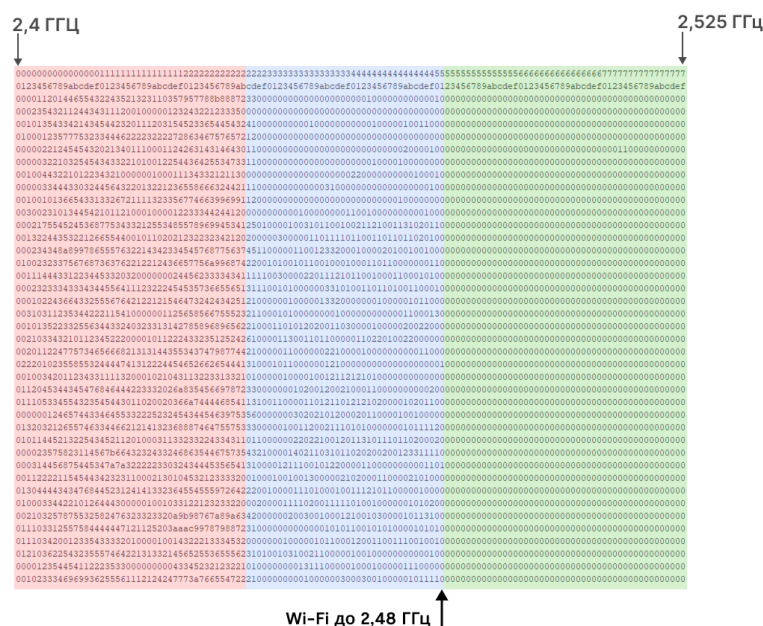


Рис. 1. Средняя задержка восстановления пакетов в зависимости от битовой ошибки в канале передачи данных

Первые две строки на рис. 1 обозначают порядковый номер канала, а значения под ними – уровень полученного радиомодулем сигнала. Красная группа каналов загружена максимально, за счет большого количества работающих в доме устройств Wi-Fi и Bluetooth. Синяя группа каналов загружена меньше. Зеленая группа относится к лицензируемой части диапазона и не может быть использована. Исходя из полученных результатов рекомендовано развертывать сеть ZigBee в синей части диапазона, а планируемую локальную сеть Wi-Fi развертывать в диапазоне 5 ГГц.

На рис. 2 представлена структура оборудования умного дома и обеспечивающей его работу сенсорной сети. Приоритетным было выбрано повышение безопасности проживания в квартире, а также автоматизация рутинных процессов. Функции дистанционного управления устройствами, в частности включение или выключение освещения, хотя и представляют собой практическую ценность, рассматриваются как вспомогательные по отношению к безопасности и автоматизации. Функционирование системы умного дома выполняется за счет команд, получаемых центральным контроллером от пользователя или от датчиков.

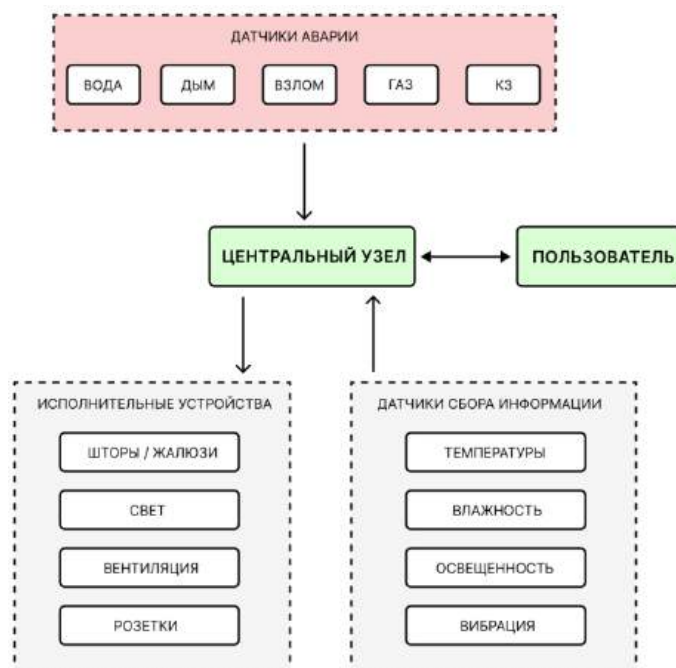


Рис. 2. Структура системы умного дома и сенсорной сети

На рис. 3 представлен проект размещения устройств сенсорной сети и умного дома на план-схеме квартиры.

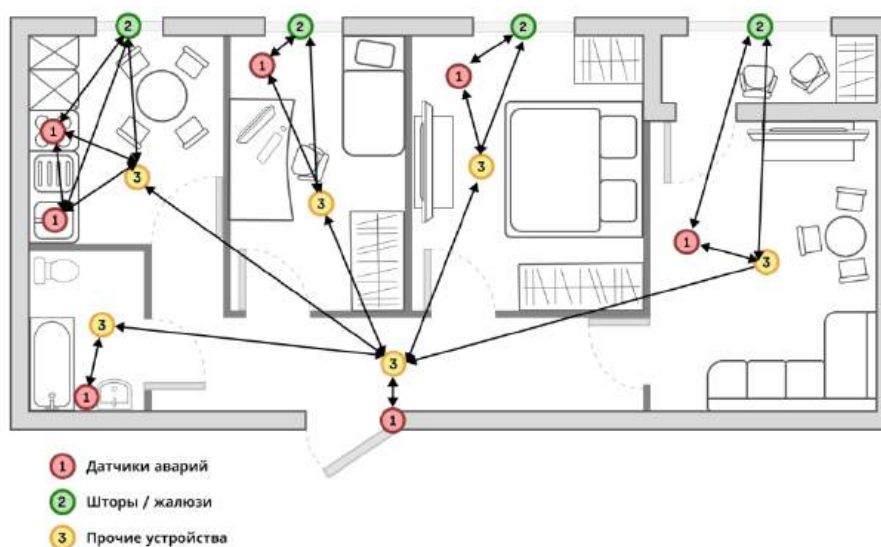


Рис. 3. Проект размещения устройств сенсорной сети и умного дома

Предлагаемая сенсорная сеть была промоделирована с использованием системы Matlab. Модель воспроизводит механизм взаимодействия устройств по протоколу ZigBee с учетом конкурентного доступа CSMA/CA, процедуры подтверждения приема, повторных передач. Кроме того, учитывается энергопотребление устройств в разных режимах работы.

На рис. 4 представлена зависимость задержки доставки пакетов от времени получения информационного пакета главным узлом беспроводной сенсорной сети.

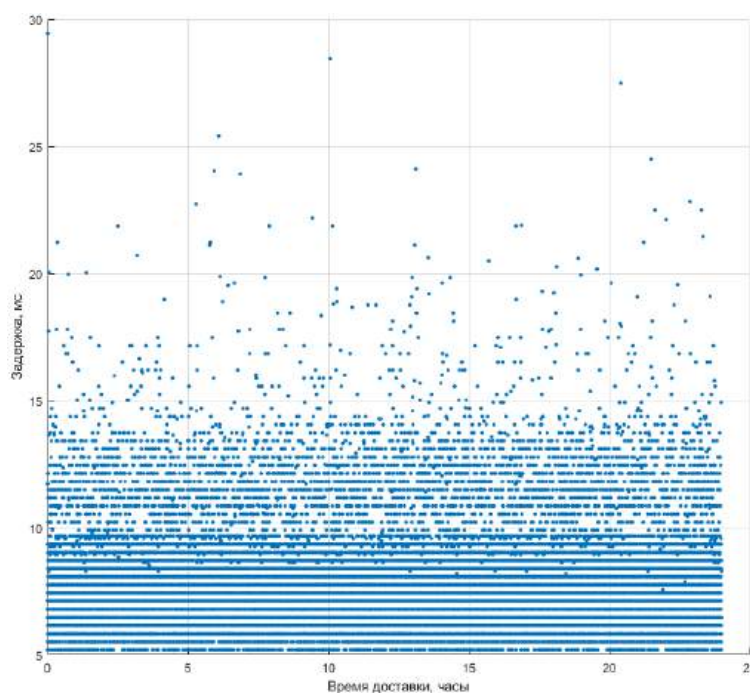


Рис. 4. Задержка доставки пакетов

Среднее время доставки пакета составило 3–12 мс с отдельными выбросами до 15–30 мс в случаях повторной передачи. Распределение задержек сети стабильное, следовательно отсутствуют перегрузки сети.

Более 94 % пакетов были переданы с первой попытки. Чуть меньше 5 % требуют одной повторной попытки, и лишь менее 1 % информационных пакетов были доставлены с помощью двух повторов. Случаи с тремя повторами в симуляции отсутствовали. Средняя пропускная способность всей сети составила 1600 пакетов в час. Сеть показала устойчивую работу без явных провалов и скачков.

Моделирование энергопотребления конечных узлов показало равномерное убывание от начального значения в 3000 мАч. За 24 часа остаточная емкость уменьшится примерно на 8,3 мАч (среднее снижение за одни сутки). Таким образом будет обеспечена автономность сети чуть менее одного года.

В дальнейшем предполагается выполнить интеграцию проектируемой системы с оконечными пользовательскими устройствами для обеспечения механизмов управления системой умного дома и сбора статистики с датчиков сенсорной сети, что позволит улучшить алгоритмы автоматизированного управления системой.

Список используемых источников

1. Danbatta S. J., Varol A. Comparison of Zigbee, Z-Wave, Wi-Fi, and Bluetooth Wireless Technologies Used in Home Automation // 2019 7th International Symposium on Digital Forensics and Security (ISDFS), Barcelos, Portugal, 10–12 June 2019. IEEE, 2019. P. 1–5. DOI: 10.1109/ISDFS.2019.8757472.
2. Кучерявый А. Е., Прокопьев А. В., Кучерявый Е. А. Самоорганизующиеся сети. Санкт-Петербург: Типография Любавич, 2011. 312 с.
3. Han T., Han B., Zhang L., Zhang X., Yang D. Coexistence study for WiFi and ZigBee under smart home scenarios // 2012 3rd IEEE International Conference on Network Infrastructure and Digital Content, Beijing, China, 21–23 September 2012. IEEE, 2012. P. 669–674. DOI: 10.1109/ICNIDC.2012.6418840.
4. Кучерявый А. Е., Кучерявый Е. А., Прокопьев А. В. Интернет Вещей и сетевые протоколы // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании: II Международная научно-техническая и научно-методическая конференция, Санкт-Петербург, 27–28 февраля 2013 года. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, 2013. С. 23–29.

**WIRELESS SENSOR NETWORK PROJECT FOR A CITY APARTMENT
IN A MULTI-APARTMENT BUILDING**

Vladimirov S., Rezinkin D., Rybachenko V., Fedorenko A.

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

The paper proposes a design for a wireless sensor network for a smart home system for a city apartment within a multi-apartment building. Technical requirements for the designed network are formulated. Based on these requirements, a data transmission technology and network topology supporting the operation of the designed sensor network are analyzed and selected. Network equipment is selected and a layout scheme is proposed, taking into account the specific features of the serviced premises. Options for further development of the deployed smart home system are discussed.

Key words: *wireless sensor network, WSN, smart home, network topology*

УДК 519.72, 621.391
ГРНТИ 49.03.05

МЕТОД HIL-CR ДЛЯ ЧАСТИЧНОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПАКЕТОВ В RLNC НА ОСНОВЕ ИЕРАРХИЧЕСКОЙ ЛОКАЛИЗАЦИИ С ПЕРЕМЕЖЕНИЕМ

С. С. Владимиров, К. Т. Хоанг

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В статье предлагается новый метод поиска и исправления ошибок для систем передачи со случайным линейным сетевым кодированием, основанный на иерархической локализации с перемежением и комбинированном восстановлении на основе показателей достоверности. Предложенный метод использует перемежение данных для снижения влияния пакетных ошибок, иерархическую локализацию ошибок для постепенного сужения области неопределенности и механизм комбинированного восстановления с направляющим вектором достоверности для приоритетной обработки символов с наибольшей вероятностью ошибки. Результаты моделирования демонстрируют, что предложенный метод обеспечивает меньшую задержку восстановления при увеличении коэффициента битовых ошибок, а также меньший темп роста задержки с увеличением размера полезной нагрузки.

случайное линейное сетевое кодирование, RLNC, частичное восстановление пакетов, иерархическая локализация ошибок, гомоморфные коды аутентификации сообщений, HMAC

Случайное линейное сетевое кодирование (Random Linear Network Coding, RLNC) признано одной из эффективных технологий сетевого кодирования, направленных на повышение пропускной способности, надежности и устойчивости к потере пакетов в беспроводных сетях связи. В рамках RLNC активно развивается подход частичного восстановления пакетов, предназначенный для непосредственного исправления ошибок, возникающих внутри закодированных пакетов. Процесс исправления битовых ошибок включает два основных этапа: локализацию ошибок и их исправление. На первом этапе определяется набор потенциальных позиций ошибок с помощью алгебраической проверки; на втором этапе выполняется поиск подходящих вариантов исправления и их подтверждение с использованием контрольных сумм или механизмов аутентификации [1–4].

В статье предлагается новый метод поиска и исправления ошибок HIL-CR (Hierarchical Interleaved Localization and Combined Recovery), основанный на данном подходе. Предлагаемый метод использует иерархическую локализацию ошибок с перемежением и комбинированное восстановление на основе показателей достоверности. В отличие от традиционных методов,

применяющих блочные циклические коды CRC, предлагаемый метод использует гомоморфные свойства кодов аутентификации сообщений НМАС. Путем интеграции иерархической структуры дерева поиска с методами перемежения данных алгоритм HIL-CR позволяет приемнику локализовать ошибки на уровне символов без внесения дополнительных затрат на передачу, что в сочетании с восстановлением на основе операций XOR позволяет значительно сократить сложность поискового пространства.

Рассматривается система передачи данных на основе RLNC, в которой исходные данные разбиваются на поколения, каждое из которых содержит g исходных пакетов p_i , представляющих собой векторы символов конечного поля Галуа $GF(2^q)$ длины l . Передатчик формирует закодированные пакеты c путем случайной линейной комбинации исходных пакетов внутри одного поколения с коэффициентами кодирования a_i :

$$c = a_1 p_1 + a_2 p_2 + \dots + a_g p_g.$$

В условиях канала с шумами принятый закодированный пакет может содержать распределенные по пакету битовые или символьные ошибки, даже небольшое число которых делает невозможным его непосредственное использование в процессе декодирования RLNC. Задача частичного восстановления пакетов заключается в непосредственном исправлении ошибочных символов в закодированном пакете с целью повторного использования уже принятых данных вместо полной повторной передачи.

Для поддержки частичного восстановления каждый закодированный пакет делится на сегменты $S = [S_1, S_2, \dots, S_n]$ одинаковой длины, где S_j – символы конечного поля Галуа $GF(2^q)$. К каждому сегменту прикрепляется аутентификационный тег, основанный на гомоморфном коде аутентификации сообщений НМАС. Задается проверочный ключ $k_i = [k_{i1}, k_{i2}, \dots, k_{in}]$ и вычисляется i -й компонент тега $t_i = \bigoplus_{j=1}^n (S_j k_{ij})$. Набор значений t_i образует вектор тегов сегмента, которые используются для проверки его целостности в процессе восстановления. Благодаря гомоморфному свойству, если $S_c = S_1 \oplus S_2$ то соответствующий тег может быть напрямую вычислен как $t_c = t_1 \oplus t_2$ [1]. Это свойство является фундаментальной основой методов комбинированного восстановления.

Для снижения влияния пакетных ошибок, при которых множество ошибочных символов концентрируется в непрерывной области и приводит к пометке всего блока или сегмента как подозрительного, в методе HIL-CR применяется этап перемежения. Этот этап переупорядочивает символы таким образом, что ошибки, сгруппированные в исходной области, распределяются более равномерно в области обработки перед выполнением локализации.

После перемежения каждый сегмент разбивается в соответствии с иерархической структурой. На первом уровне весь сегмент делится на крупные блоки. Каждый блок проверяется на наличие ошибок посредством механизмов согласованности или аутентификации. Блоки, помеченные как подозрительные, подвергаются дальнейшему разбиению на следующем уровне. Эта процедура повторяется до достижения требуемого разрешения.

После определения сегментов с ошибками и назначения им оценок достоверности, они организуются в стеки в соответствии со своими индексами в закодированных пакетах. В каждом стеке сегменты с ошибками последовательно объединяются в пары, для которых вычисляются объединенный сегмент S_c и соответствующий объединенный тег t_c .

Для каждого кандидата на исправление тег объединенного сегмента пересчитывается и сравнивается с t_c . При совпадении приемник получает исправленную версию объединенного сегмента S_c^* . Затем исходные сегменты восстанавливаются по формулам $S_1^* = S_2 \oplus S_c^*$ и $S_2^* = S_1 \oplus S_c^*$, после чего дополнительно проверяются с использованием исходных тегов для подтверждения корректности исправления.

Оценка метода HIL-CR проведена по параметру задержки восстановления пакетов в сравнении с двумя известными подходами частичного восстановления пакетов S-PRAC и QPPR.

Средняя задержка восстановления пакетов в зависимости от битовой ошибки в канале передачи данных показана на рис. 1.

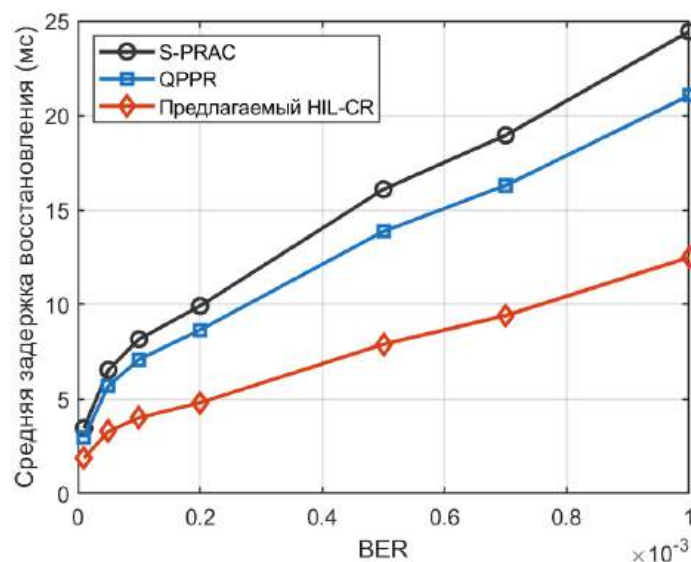


Рис. 1. Средняя задержка восстановления пакетов в зависимости от битовой ошибки в канале передачи данных

Из графиков на рис. 1 видно, что средняя задержка восстановления возрастает по мере увеличения BER для всех трех методов, однако предлагае-

мый метод HIL-CR обеспечивает меньшую задержку на всем исследованном диапазоне битовой ошибки за счет снижения вычислительных затрат на этапе восстановления пакетов. Если методы S-PRAC и QPPR, основанные на бинарном множестве подозрительных позиций, выполняют обработку по относительно широкому набору потенциально ошибочных символов, то HIL-CR использует локализацию, управляемую оценкой достоверности, что позволяет в первую очередь обрабатывать символы с наибольшей вероятностью ошибки до начала процедуры исправления. В результате количество проверяемых комбинаций в процессе восстановления уменьшается, что приводит к снижению общей задержки.

На рис. 2 показана средняя задержка восстановления пакетов в зависимости от размера полезной нагрузки пакета.

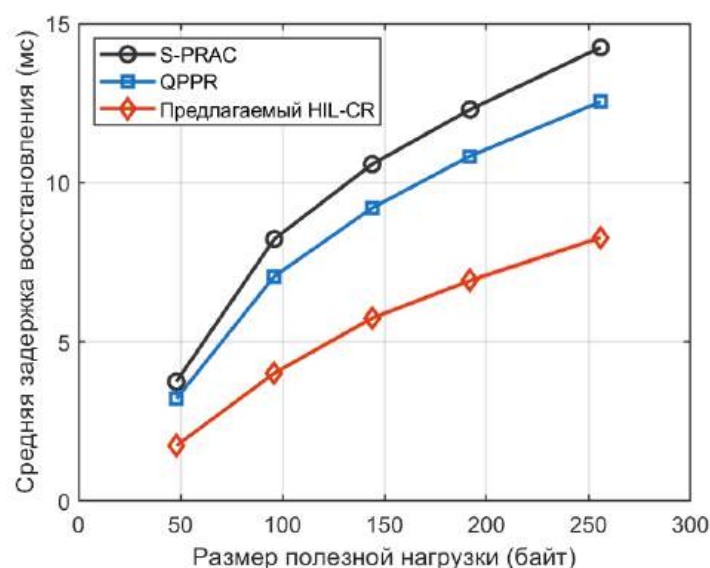


Рис. 2. Средняя задержка восстановления пакетов в зависимости от размера полезной нагрузки пакета

Средняя задержка восстановления пакетов для всех рассмотренных алгоритмов увеличивается с ростом размера полезной нагрузки, поскольку увеличение объема передаваемых данных приводит к росту числа обрабатываемых символов, увеличению количества проверяемых блоков, а также к возрастанию затрат на аутентификацию и исправление ошибок. При этом, согласно полученным при моделировании результатам, алгоритм HIL-CR демонстрирует наименьшую среднюю задержку восстановления и меньше зависит от увеличения размера полезной нагрузки.

Результаты моделирования показывают, что предлагаемый метод HIL-CR обеспечивает лучшие характеристики по сравнению с известными методами S-PRAC и QPPR, демонстрируя меньшую задержку восстановления

при увеличении битовой ошибки в канале и меньше зависит от увеличения размера полезной нагрузки. Таким образом, интеграция иерархической локализации с управляемым процессом восстановления представляет собой перспективное направление, позволяющее сократить пространство поиска и повысить эффективность восстановления пакетов в системах со случайным сетевым кодированием.

Список используемых источников

1. Li C., Chen L., Lu R., Li H. Comment on “An Efficient Homomorphic MAC with Small Key Size for Authentication in Network Coding” // IEEE Transactions on Computers. 2015. Vol. 64, Iss. 3. P. 882–883. DOI: 10.1109/TC.2015.2389800.
2. Fathi A., Pahlevani P. Enhancing Partial Packet Recovery in RLNC Using Homomorphic Message Authentication Codes // IEEE Communications Letters. 2025. Vol. 29, Iss. 9. P. 2118–2122. DOI: 10.1109/LCOMM.2025.3587820.
3. Fragouli C., Soljanin E. Network coding fundamentals // Foundations and Trends® in Networking. 2007. Vol. 2, Iss. 1. P. 1–133. DOI: 10.1561/13000000003.
4. Gholamian V., Nazari H. K., Pahlevani P., Fitzek F. H. P. Accelerating Partial Packet Recovery in RLNC // IEEE Communications Letters. 2023. Vol. 27, Iss. 10. P. 2548–2552. DOI: 10.1109/LCOMM.2023.3312271.

HIL-CR METHOD FOR PARTIAL PACKET RECOVERY IN RLNC BASED ON HIERARCHICAL LOCALIZATION WITH INTERLEAVING

Vladimirov S., Hoang K.

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

This paper proposes a new error detection and correction method for transmission systems with random linear network coding. This method is based on hierarchical localization with interleaving and combined recovery based on confidence metrics. The proposed method utilizes data interleaving to reduce the impact of burst errors, hierarchical error localization to gradually narrow the uncertainty domain, and a combined recovery mechanism with a confidence vector guide to prioritize processing of symbols with the highest error probability. Simulation results demonstrate that the proposed method provides lower recovery delay with increasing bit error rate, as well as a lower rate of delay increase with increasing payload size.

Key words: random linear network coding, RLNC, partial packet recovery, hierarchical error localization, homomorphic message authentication codes, HMAC

УДК 006.07
ГРНТИ 84.01.01

О ПОДГОТОВКЕ СПЕЦИАЛИСТОВ ДЛЯ ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ ТЕХНИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ ГОСУДАРСТВЕННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

В. А. Волостных¹, В. А. Задбоев¹, А. А. Шевченко²

¹Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного

²Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича

В статье представлены результаты анализа требований нормативных правовых актов Российской Федерации, регулирующих защиту государственных информационных систем, в части кадрового обеспечения подразделений технической защиты информации. Рассмотрены требования к функциям и подготовке специалистов, применению средств криптографической защиты информации и организации аттестационных работ. Аспекты подготовки специалистов подразделений по защите государственной тайны не рассматриваются. Предложены практические меры по подготовке кадров и снижению их дефицита в подразделениях технической защиты информации.

государственные информационные системы, информационная безопасность, квалификационные требования, образовательные организации, обучение, подготовка специалистов, профессиональные стандарты, средства защиты информации, средства криптографической защиты информации, угрозы безопасности информации

Устойчивость государственных информационных систем (далее – ГИС) непосредственно зависит от защищенности обрабатываемой в них информации. Нарушение работы таких систем может остановить отдельные управленческие процессы, а компрометация данных – причинить ущерб государственному органу или организации. Поэтому при создании и эксплуатации ГИС необходимы не только технические средства защиты, но и подготовленный персонал, способный поддерживать систему защиты информации в рабочем состоянии.

На практике кадровое обеспечение нередко становится слабым звеном. Специалисту по технической защите информации (ТЗИ) приходится работать с нормативными требованиями и организационно-распорядительными документами, применять средства защиты информации, взаимодействовать с администраторами и пользователями информационных систем.

Изменения нормативной базы 2022–2025 гг. расширили круг организаций и информационных систем, к которым предъявляются обязательные требования по защите информации. Это требует уточнения содержания подготовки специалистов ТЗИ. Ниже рассмотрены положения нормативных актов, непосредственно влияющие на состав их функций, уровень подготовки и взаимодействие с другими подразделениями.

Базовые понятия закреплены Федеральным законом от 27 июля 2006 г. № 149-ФЗ. Информационная система определяется как совокупность содержащейся в базах данных информации и обеспечивающих ее обработку информационных технологий и технических средств. К государственным относятся федеральные и региональные информационные системы, создаваемые на основании федеральных законов, законов субъектов Российской Федерации и правовых актов государственных органов. Содержащиеся в них сведения образуют государственные информационные ресурсы и подлежат защите [1].

Кадровая составляющая защиты информации была усилена Указом Президента Российской Федерации от 1 мая 2022 г. № 250. В органах и организациях должны быть определены должностные лица, отвечающие за информационную безопасность, а также созданы подразделения, выполняющие соответствующие функции. В их задачи входят предупреждение и выявление компьютерных атак, ликвидация их последствий и реагирование на компьютерные инциденты [2].

Постановление Правительства Российской Федерации от 15 июля 2022 г. № 1272 конкретизировало полномочия ответственного должностного лица и функции подразделения информационной безопасности. Подразделение организует защиту информации, участвует в формировании политики информационной безопасности и подготовке предложений по развитию соответствующих процессов [3].

Для подготовки кадров важно, что работа такого подразделения не сводится к эксплуатации отдельных средств защиты. Специалист должен понимать цели и риски информационной безопасности, уметь планировать мероприятия, готовить внутренние документы, контролировать выполнение требований и докладывать руководству о состоянии защиты информации.

Отдельное направление связано с применением средств криптографической защиты информации (СКЗИ). Приказ ФСБ России от 18 марта 2025

г. № 117 распространил требования на ГИС и иные информационные системы государственных органов, государственных унитарных предприятий и государственных учреждений. Для защиты должны применяться сертифицированные ФСБ России СКЗИ, класс которых выбирается с учетом актуальных угроз безопасности информации [4].

СКЗИ используются в том числе при работе со средствами электронной подписи. Поэтому специалисту ТЗИ необходимы практические навыки выбора, внедрения и эксплуатации криптографических средств, а также умение обучать пользователей правилам обращения с ключевыми носителями и электронной подписью.

С 1 марта 2026 г. действует приказ ФСТЭК России от 11 апреля 2025 г. № 117, утвердивший новые требования к защите информации в ГИС и иных информационных системах государственных органов, государственных унитарных предприятий и государственных учреждений [5].

В части кадрового обеспечения приказ требует, чтобы руководитель оператора, либо назначенное им ответственное лицо, организовали работы по защите информации, управление ими и контроль их выполнения. Полномочия и обязанности ответственного лица должны быть закреплены в должностной инструкции.

Для выполнения установленных функций создается структурное подразделение по защите информации либо назначаются отдельные специалисты. Работники должны обладать необходимыми компетенциями, причем не менее 30 % работников подразделения должны иметь профессиональное образование в области информационной безопасности или пройти профессиональную переподготовку по данному направлению [5].

Защита информации организуется во взаимодействии специалистов ТЗИ с работниками, использующими информационные системы, и подразделениями, обеспечивающими их эксплуатацию. Следовательно, программы подготовки должны формировать не только технические знания, но и навыки совместного планирования работ, распределения ответственности и контроля исполнения внутренних регламентов.

Подготовка специалистов, участвующих в аттестации объектов информатизации, должна учитывать приказ ФСТЭК России от 29 апреля 2021 г. № 77. Он устанавливает порядок организации и проведения аттестацион-

ных работ на соответствие требованиям по защите информации ограниченного доступа, не составляющей государственную тайну [6].

В образовательных программах целесообразно предусмотреть разработку программы и методик аттестационных испытаний, анализ организационно-распорядительной документации, проверку настроек средств защиты и оформление результатов аттестации. Такие задания позволяют связать нормативные положения с практической работой специалиста.

Таким образом, актуальная подготовка специалиста ТЗИ должна охватывать организационные, технические и криптографические меры защиты, сопровождение ГИС, участие в аттестации и взаимодействие с пользователями и эксплуатационными подразделениями.

С учетом перечисленных функций подготовку целесообразно строить по модульному принципу. Базовый модуль должен включать нормативные основы и организацию защиты информации, технический – моделирование угроз, настройку и контроль средств защиты, криптографический – применение СКЗИ и средств электронной подписи, практический – подготовку документов и проведение аттестационных работ. При наполнении практических модулей может быть использован опыт организации защищенного электронного документооборота и применения СКЗИ, рассмотренный в работах [7-8].

Для уменьшения кадрового дефицита целесообразно сочетать целевое обучение в профильных образовательных организациях с переподготовкой действующих работников. Дополнительный эффект могут дать стажировки на базе операторов ГИС, закрепление наставников за начинающими специалистами и регулярные совместные занятия работников ТЗИ, администраторов и пользователей информационных систем.

Выводы

1. Проведенный анализ показал, что новые нормативные требования расширили круг информационных систем и организаций, в которых необходимо обеспечивать защиту информации. Одновременно увеличился состав функций, возлагаемых на специалистов ТЗИ.

2. Кадровое обеспечение становится самостоятельным условием выполнения требований по защите информации. Особое значение имеют профильная подготовка части работников, практические навыки работы со

средствами защиты и способность взаимодействовать с пользователями и подразделениями эксплуатации.

3. Снижение кадрового дефицита требует совместной работы операторов ГИС и образовательных организаций: целевой подготовки, регулярного повышения квалификации, стажировок, наставничества и включения в учебные программы практических задач, соответствующих действующим нормативным требованиям.

Список используемых источников

1. Федеральный закон от 27 июля 2006 г. № 149-ФЗ «Об информации, информационных технологиях и о защите информации».
2. Указ Президента Российской Федерации от 1 мая 2022 г. № 250 «О дополнительных мерах по обеспечению информационной безопасности Российской Федерации».
3. Постановление Правительства Российской Федерации от 15 июля 2022 г. № 1272 «Об утверждении типового положения о заместителе руководителя органа (организации), ответственном за обеспечение информационной безопасности в органе (организации), и типового положения о структурном подразделении в органе (организации), обеспечивающем информационную безопасность органа (организации)».
4. Приказ ФСБ России от 18 марта 2025 г. № 117 «Об утверждении Требований о защите информации, содержащейся в государственных информационных системах, иных информационных системах государственных органов, государственных унитарных предприятий, государственных учреждений, с использованием шифровальных (криптографических) средств».
5. Приказ ФСТЭК России от 11 апреля 2025 г. № 117 «Об утверждении Требований о защите информации, содержащейся в государственных информационных системах, иных информационных системах государственных органов, государственных унитарных предприятий, государственных учреждений».
6. Приказ ФСТЭК России от 29 апреля 2021 г. № 77 «Об утверждении Порядка организации и проведения работ по аттестации объектов информатизации на соответствие требованиям о защите информации ограниченного доступа, не составляющей государственную тайну».
7. Волостных В. А., Задбоев В. А. Создание систем защищенного электронного документооборота, предназначенных для обработки документов, содержащих информацию ограниченного распространения // 65-я научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава, научных работников и аспирантов: сб. науч. ст. Санкт-Петербург: СПбГУТ, 2025. С. 79–84.
8. Волостных В. А., Воробьев П. А., Задбоев В. А. Организация защиты конфиденциальной информации на предприятии средствами криптографической защиты // Перспективы безопасности – 2024: сборник материалов II научно-технической конференции. Санкт-Петербург, 2024. С. 9–13.

ON THE TRAINING OF SPECIALISTS FOR THE TECHNICAL INFORMATION
SECURITY UNITS OF STATE INFORMATION SYSTEMS

Volostnyh V.¹, Zadboev V.¹, Shevchenko A.²

¹Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S. M. Budyonny

²The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

This article presents the results of an analysis of new requirements in Russian regulatory documents for the protection of state information systems, as they relate to the professional training of specialists in technical information protection (information security) units within state information systems. The article does not address aspects of training specialists in units responsible for protecting state secrets. Based on the experience of several enterprises and educational institutions, ways to alleviate the shortage of personnel in technical information protection units are proposed.

Key words: government information systems, information security, qualification requirements, educational organizations, education, training of specialists, professional standards, information security tools, cryptographic information protection tools, information security threats

УДК 528.913

ГРНТИ 50.41.25

ТЕХНИЧЕСКИЙ АСПЕКТ ОРГАНИЗАЦИИ ИНФОРМАЦИОННОЙ ДОСТУПНОСТИ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ СИЛАМИ И СРЕДСТВАМИ ОПЕРАТИВНОГО РЕАГИРОВАНИЯ

В. И. Ворончук, С. Б. Ногин, О. И. Пантюхин

Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного

Обеспечение управления силами и средствами оперативного реагирования на различного рода происшествия во многом определяется информационной доступностью данных, используемых в соответствующей системе управления. При этом методы и способы обеспечения информационной доступности в рамках существующих систем управления могут существенно различаться. В статье рассматривается технический аспект одного из подходов по обеспечению информационной доступности в соответствующей системе.

система оперативного управления, информационная доступность, безотказность, живучесть

Управление силами и средствами оперативного реагирования предполагает прием информации о том или ином происшествии, анализ ситуации, принятие решения о привлечении соответствующих подразделений и техники для ликвидации последствий происшествия, доведение требуемой информации до должностных лиц, контроль отправки сил и средств на происшествие и их действий на месте.

Современная автоматизированная система оперативного управления силами и средствами оперативного реагирования (АСУССОР) как правило включает в себя ряд подсистем, обеспечивающих обработку информации о состоянии сил и средств оперативного реагирования, данных о текущей обстановке в соответствующих зонах ответственности, данных об обстановке в местах происшествий, данных о действиях подразделений и т.п. Система строится по клиент-серверной технологии и включает в себя множество территориально разнесенных элементов (таких как АРМ соответствующих должностных лиц, контуры серверных элементов, коммутационное оборудование и др.), соединенных защищенными каналами передачи данных.

Реализация процесса управления силами и средствами оперативного реагирования в реальном масштабе времени требует постоянной доступности данных для всех категорий должностных лиц.

Под доступностью данных понимается:

- состояние информации, характеризующееся способностью автоматизированной системы обеспечивать беспрепятственный доступ к информации субъектов, имеющих на это полномочия;
- свойство быть доступным и готовым к использованию по запросу авторизованного субъекта [1].

Отсутствие информационной доступности предполагает невозможность пользователей выполнить задачи по управлению силами реагирования, таких как контроль текущего состояния техники, отправка техники и личного состава на происшествие, оповещения соответствующих должностных лиц. Кроме того, недоступность информации зачастую приводит к нарушению регламентов реагирования на происшествия.

Как правило, последствиями отсутствия информационной доступности являются:

- невозможность использования данных;
- нарушение функционирования системы.

Основным способом обеспечения безотказности в период эксплуатации АСУССОР является проактивное управление всеми компонентами системы.

Проактивное управление базируется на постоянном сборе и анализе информации о функционировании АСУССОР. В основе сбора данных лежит мониторинг технического состояния аппаратного обеспечения (средств вычислительной техники, коммутационного оборудования и др.), мониторинг событий информационной безопасности и мониторинг информационного процесса в системе.

Основным средством повышения живучести является резервирование технических средств и тиражирование информационных ресурсов. Как правило, резервирование осуществляется на этапе ввода системы в эксплуатацию или изменения ее конфигурации в процессе эксплуатации.

В АСУССОР для обеспечения информационной доступности используются:

- кластеризация (территориальное разнесение, кластер приложений, кластер баз данных, балансировщики нагрузки);
- репликация данных (синхронизация в рамках СУБД PostgreSQL);

- распределенная файловая система;
- резервное копирование;
- создание точек восстановления;
- мониторинг технического состояния;
- мониторинг событий информационной безопасности (в части технических средств);
- мониторинг информационного процесса;
- проактивное управление;
- программный КЭШ на АРМ в случае обрыва канала связи.

В рамках АСУССОР для обеспечения информационной доступности реализован отказоустойчивый распределенный кластер, включающий кластер серверов приложений и кластер серверов баз данных.

Кластер серверов приложений реализован в виде двух территориально разнесенных серверов под управлением ОС AstraLinux SE с установленной программой keepalived. Основной задействованный функционал программы – отслеживание состояния серверов, организация механизма переключения с одного сервера на другой при возникновении отказов и управление виртуальными IP-адресами для обеспечения доступа пользователям.

Балансировщик нагрузки в системе реализован на базе программы nginx. Он обеспечивает подключение пользователей к одному из серверов приложений в соответствии с заданным алгоритмом балансировки.

Отправка запросов от сервера приложений на доступ к данным определяется состоянием «master» в сервера БД в кластере баз данных.

В кластере баз данных используются три сервера: на двух реализован непосредственно сам кластер на базе СУБД PostgreSQL и программного продукта Patroni, третий сервер выступает в качестве компонента (программа etcd), который обеспечивает хранение и синхронизацию конфигурационных данных в системе. Patroni отвечает за выбор режима «master» соответствующего сервера, синхронизацию данных в БД через репликацию, переназначение роли сервера БД в случае выхода основного сервера из строя.

В системе настроена асинхронная репликация данных.

На текущий момент в качестве средств резервного копирования серверов и АРМ пользователей используются встроенные средства операционной системы AstraLinux SE (команда DD).

Для создания резервной копии базы данных используются встроенные средства СУБД PostgreSQL.

Создание точек восстановления серверов и АРМ пользователей осуществляется с помощью приложения Timeshift из состава AstraLinux SE. В системе настроено автоматическое создание точек восстановления. При необходимости восстановление системы на компьютере осуществляется из последней созданной точки.

Мониторинг технического состояния оборудования и мониторинг информационного процесса реализован с помощью системы Zabbix.

Мониторинг событий информационной безопасности (в части технических средств, таких как отказ записи в БД информации о событиях информационной безопасности и ряд других) реализован в составе программного кода АСУССОР.

Список используемых источников

1. Государственная техническая комиссия при Президенте Российской Федерации «Специальные требования и рекомендации по технической защите конфиденциальной информации» (СТР-К). Москва, 2001.
2. ГОСТ Р ИСО/МЭК 27000-2021. Национальный стандарт Российской Федерации. Информационные технологии. Методы и средства обеспечения безопасности. Системы менеджмента информационной безопасности. Общий обзор и терминология.

TECHNICAL ASPECT OF ORGANIZING INFORMATION AVAILABILITY IN THE RAPID RESPONSE FORCES AND MEANS CONTROL SYSTEM

Voronchuk V., Nogin S., Pantyukhin O.

Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S. M. Budyonny

Ensuring the control of emergency response forces and resources for various types of incidents is largely determined by the information availability of the data used in the relevant command and control system. However, the methods and techniques for ensuring information availability within existing command and control systems can vary significantly. This article examines the technical aspects of one approach to ensuring information availability within the relevant system.

Key words: operational command and control system, information availability, reliability, survivability

УДК 621.396

ГРНТИ 49.43.00

**ТРАССИРОВКА ЛУЧЕЙ С ПОДВИЖНЫМИ АБОНЕНТАМИ
СЕТЕЙ 5G В СРЕДЕ SIONNA RT****Е. А. Воскресенский, В. В. Стариков**

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В работе исследуются возможности библиотеки Sionna RT для имитационного моделирования радиоканалов в сотовых сетях связи при наличии подвижных абонентских устройств. Актуальность исследования обусловлена необходимостью оценки параметров канала в сценариях с высокой мобильностью, характерных для современных стандартов 5G и перспективных 6G. Рассмотрен механизм учета доплеровских эффектов, а также приведено количественное сравнение результатов моделирования с эталонными аналитическими моделями. Моделирование проводилось для городского сценария «улица» при различных скоростях движения абонента. Выполнен расчет импульсных характеристик канала, доплеровских сдвигов частоты и уровней принимаемого сигнала. Выявлен различный характер вклада лучей: переотражения от стационарных объектов вносят квазипериодическую составляющую, тогда как отражения от движущихся объектов приводят к хаотической флуктуации мощности.

Sionna RT, трассировка лучей, моделирование радиоканала, сотовая связь, 5G, 6G

Фундаментальной особенностью систем мобильной связи, отличающей их от стационарных радиосетей, является наличие подвижных абонентских устройств. Термин «мобильная связь» исторически и технически означает обеспечение непрерывного информационного обмена с заданным качеством при изменении пространственного положения абонентского терминала [1]. Движение абонента вносит нестационарность в радиоканал – быстрые замирания сигнала. Обозначенный факт требует постоянной адаптации параметров передачи [2].

Развитие стандартов 5G предъявляет жесткие требования к работе сетей в условиях высокой мобильности, к которым относят скоростной транспорт, беспилотные летательные аппараты и роботизированные системы [3]. Вышеупомянутый факт обуславливает актуальность задачи имитационного моделирования радиоканалов с подвижными абонентами. Одним из самых распространенных инструментов, используемых для радиопланирования сетей 5G, является библиотека Sionna RT. Однако ее способность корректно

воспроизводить динамику канала, обусловленную движением абонента, требует тщательной верификации. На рис. 1 представлен пример моделирования улицы с подвижными абонентами.

В настоящей работе исследуются возможности Sionna RT по моделированию подвижных абонентских терминалов в городском сценарии «улица».

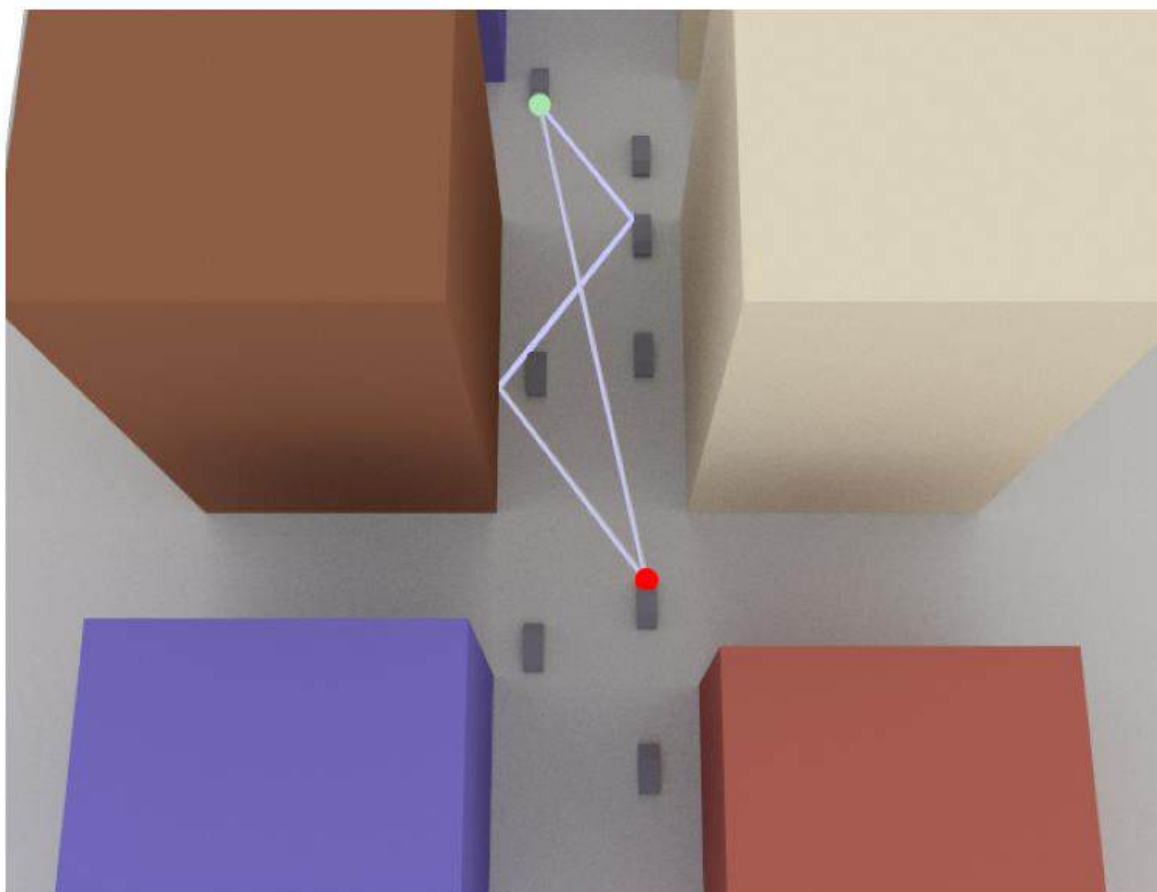


Рис. 1. Пример моделирования в Sionna RT

Особую важность для работы в мобильных сценариях приобретает корректный учет угловых характеристик антенных систем [4]. Для использования диапазонов 5-го поколения возникла необходимость применения узконаправленных антенн или создания антенных решеток с целью повышения коэффициента усиления и пространственной избирательности [5]. Антенная решетка состоит из одинаковых элементов, которые могут иметь разный тип поляризации. Sionna RT позволяет реализовать три вида поляризации: Е-поляризация, Н-поляризация и круговая ЕН. При этом класс антенной решетки PlanarArray способен принимать четвертый аргумент – «кросс-поляризацию», которая имитирует паразитное излучение относительно основ-

ной поляризации [6]. По умолчанию Sionna RT использует модель поляризации tr38901, описанную в документе [7]. Для создания антенной решетки необходимо задать количество столбцов и строк. Фрагмент программного кода, описывающего процесс создания антенной решетки, можно представить следующим образом:

```
array = PlanarArray(num_rows=8, num_cols=4,  
    pattern=«tr38901»,  
    polarization=«VH»)
```

Для вычисления доплеровского сдвига вводится вектор $\mathbf{k}_0$, обозначающий направление выхода луча от передатчика, и вектор $\mathbf{k}_n$, обозначающий направление прихода луча к приемнику.

В общем случае при наличии нескольких движущихся объектов, результирующая частота на приеме определяется произведением доплеровских множителей для каждого сегмента пути. С учетом условия малости отношения $\frac{v^T \times \hat{k}}{c} \ll 1$ (где v – скорость объекта, $\hat{k}$ – единичный вектор направления распространения луча, c – скорость света) можно получить приближенное уравнение для доплеровского сдвига Δf на всей трассе распространения [6]:

$$\Delta f = \left(\frac{1}{\lambda}\right) * [v_0^T \hat{k}_0 - v_{n+1}^T \hat{k}_n + \sum_{i=1}^n v_i^T (\hat{k}_i - \hat{k}_{i-1})] [\text{Гц}] \quad (1)$$

В уравнении (1) первый член $v_0^T \hat{k}_0$ вносит вклад скорости передатчика v_0 вдоль направления выхода луча. Последний член $-v_{n+1}^T \hat{k}_n$ – соответствует движению приемника. Сумма для каждого промежуточного рассеивателя i учитывает изменение направления луча $\hat{k}_i$ относительно $\hat{k}_{i-1}$, спроецированное на скорость этого рассеивателя. Если луч не меняет направление, вклад данного рассеивателя может быть нулевым.

Аналитическое уравнение (1) для доплеровского сдвига Δf учитывает вклад всех движущихся объектов (рис. 2) на трассе распространения сигнала: передатчика, приемника и каждого промежуточного рассеивателя. Однако при имитационном моделировании радиоканалов с высокой мобильностью возникает практическая проблема: если моделировать движение объектов путем их физического перемещения между временными срезами, это приводит к необходимости многократного перестроения путей распространения, что вычислительно затратно, особенно для коротких временных интервалов.

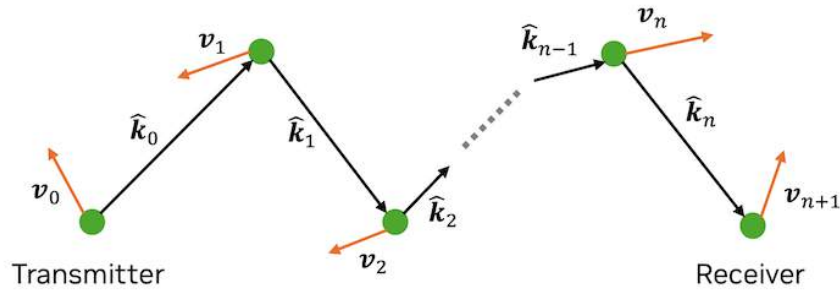


Рис. 2. Визуальное представление аналитического выражения (1)

Sionna RT предлагает альтернативный, более эффективный подход, на рис. 3 представлено сравнение результатов моделирования двух методов. Вместо непосредственного изменения координат объектов на каждом шаге по времени, библиотека позволяет назначить каждому объекту вектор скорости $v_i \in \mathbb{R}^3$ через свойство `velocity`. При решении задачи распространения лучей с помощью `PathSolver` для каждого найденного пути автоматически вычисляется агрегированный доплеровский сдвиг на основе указанных скоростей, направлений выхода и прихода лучей, а также зафиксированных взаимодействий луча с поверхностями. Соответствующий фрагмент программного кода имеет вид:

```
# Задание скорости отражателю
scene.get(«reflector»).velocity = [0, 0, -20]
# Вычисление путей и доплеровских сдвигов
paths = p_solver(scene=scene, max_depth = 1)
```

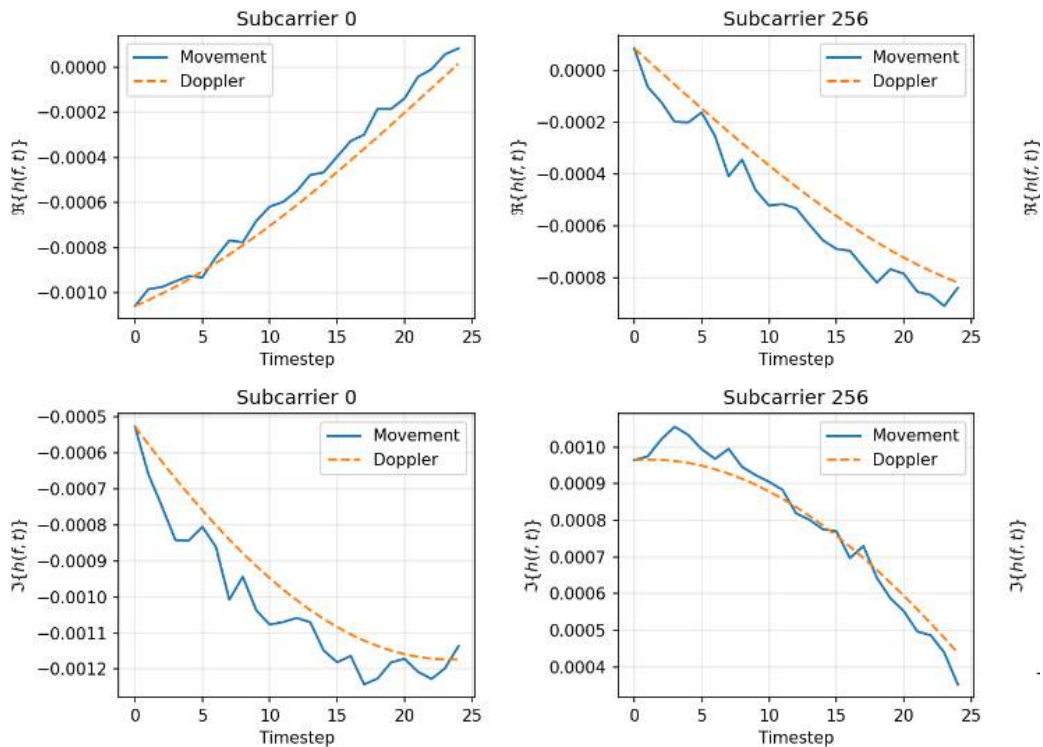


Рис. 3. Сравнение результатов моделирования двух методов

Возвращаемое массивом `paths.doppler` значение соответствует сумме вкладов всех движущихся объектов согласно формуле (1). Представленный подход позволяет моделировать временную эволюцию канала без необходимости явного перемещения объектов, но он имеет ряд ограничений:

1. Промоделированная траектория распространения луча остается фиксированной, что справедливо только для бесконечно малых временных интервалов.

2. Так как проводится однократное моделирование, то задержки распространения луча и потери на трассе остаются неизменными.

3. Направления лучей $\hat{k}_i$ остаются неизменными, тогда как, согласно формуле (1), доплеровский вклад каждого движущегося объекта зависит именно от изменения этих направлений.

4. Векторный метод не позволяет моделировать продолжительные по времени сценарии, ведь изменения взаимного расположения объектов друг относительно друга окажут негативное влияние на результат моделирования.

Так как верификация проводится на коротких временных интервалах, указанные ограничения не влияют на конечный результат. В дальнейшем, при сравнении данного метода с другими, стоит учитывать эти ограничения.

Список используемых источников

1. Джейкс У. К. и др. Связь с подвижными объектами в диапазоне СВЧ / Пер. с англ. М.: Связь, 1979. 518 с.
2. Стариков В. В., Фокин Г. А. Трассировка лучей в сетях радиодоступа пятого и последующих поколений. Часть 1. Анализ состояния проблемы // Первая миля. 2025. № 8(132). С. 38–45. DOI: 10.22184/2070-8963.2025.132.8.38.45. EDN: CNNUHA
3. Стариков В. В., Фокин Г. А. Трассировка лучей в сетях радиодоступа пятого и последующих поколений. Часть 2. Теоретические основы и практическое применение метода SBR // Первая миля. 2026. № 1(133). С. 42-50. DOI: 10.22184/2070-8963.2026.133.1.42.50. EDN: AZEZBH
4. Фокин Г. А. Моделирование многолучевого радиоканала / Г. А. Фокин // Информационные технологии и телекоммуникации. 2021. Т. 9. № 1. С. 59-78.
5. Haupt R., Lanagan M. Reconfigurable antennas. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2013. Vol. 55. N 1. PP. 49-61.
6. Sionna RT: Ray Tracing (RT) [Электронный ресурс] // NVIDIA Labs: сайт – URL: <https://nvlabs.github.io/sionna/rt/index.html> (дата обращения: 10.04.2026).
7. 3GPP K. Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz //3rd Generation Partnership Project (3GPP), Technical Specification (TS) 38.901. 2018.

Статья представлена заведующим кафедрой БТС СПбГУТ, доктором технических наук, доцентом Г. А. Фокиным.

RAY TRACING WITH MOBILE SUBSCRIBERS IN 5G NETWORKS USING THE SIONNA RT ENVIRONMENT

Voskresenskii E., Starikov V.

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

This paper investigates the capabilities of the Sionna RT library for simulation modeling of radio channels in cellular communication networks in the presence of mobile user equipment. The relevance of the study stems from the need to evaluate channel parameters in high-mobility scenarios, which are characteristic of modern 5G and advanced 6G standards. The mechanism for accounting for Doppler effects is examined, and a quantitative comparison of the simulation results with reference analytical models is provided. The simulation was conducted for an urban “street” scenario at various subscriber speeds. The calculations included channel impulse responses, Doppler frequency shifts, and received signal levels. A distinct nature of the contribution of rays is revealed: reflections from stationary objects introduce a quasi-periodic component, whereas reflections from moving objects lead to chaotic power fluctuations.

Key words: Sionna RT, ray tracing, radio channel modeling, cellular communications, 5G, 6G

УДК 621.391.8

ГРНТИ 3.49.25

**АНАЛИТИЧЕСКОЕ И ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ ПРИЕМА ЦИФРОВЫХ СИГНАЛОВ
КАМ-4 ПРИ СОВМЕСТНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ АБГШ
И ПРЕРЫВИСТОЙ СТРУКТУРНОЙ
ДВУХПОЗИЦИОННОЙ ФАЗОВОЙ ПОМЕХИ**

М. Ю. Галкина¹, А. А. Пелин², Н. В. Савищенко²

¹Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики

²Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного

Исследуется помехоустойчивость когерентного приема цифровых сигналов при воздействии АБГШ и прерывистой структурной помехи. Новизна состоит в выводе замкнутых аналитических соотношений для битовой ошибки без стохастического численного интегрирования. Синтезирован математический аппарат поиска оптимальной вероятности (скважности) излучения помехи, вызывающей максимальную деградацию связи, что исключает длительное машинное имитационное моделирование радиотрактов.

помехоустойчивость, структурная помеха, прерывистое излучение, отношение сигнал-шум, замкнутые аналитические формы, преднамеренные помехи, цифровые радиолинии

Введение

Фундаментальным критерием работоспособности современных цифровых систем радиосвязи критического назначения является удержание средней вероятности битовой ошибки P_b на требуемом уровне при эксплуатации в сложной радиоэлектронной обстановке. Как правило, когерентные приемники связи аппаратно и алгоритмически синтезируются по критерию идеальной помехоустойчивости в условиях флуктуаций (например, многолучевых замираний) и стационарного аддитивного белого гауссовского шума (АБГШ) [1]. Однако на практике значительную опасность представляют преднамеренные прицельные или прерывистые помехи, генерируемые по тем же базисным функциям, что и полезный информационный сигнал (помехи, подобные сигналу, или структурные помехи) [2]. Если источник излучает преднамеренную помеху на тактовых интервалах в прерывистом (мерцающем) режиме с сохранением средней излучаемой мощности, стандарт-

ные согласованные фильтры и демодуляторы, настроенные исключительно на фильтрацию АБГШ, испытывают значительный рост ошибочных решений.

Существующие алгоритмы расчета помехоустойчивости приема сигналов в условиях комбинированных помех ограничены необходимостью применения метода Монте-Карло, имеющего жесткие ограничения точности и временных затрат в зонах высоконадежного приема ($P_b \leq 10^{-6}$), либо используют математически нестрогие верхние оценочные границы. В связи с этим разработка универсального аналитического аппарата, позволяющего инженерам в закрытой форме предсказывать качество приема и математически определять наилучшую стратегию воздействия (оптимальную вероятность излучения структурной помехи $p_{u,opt}$), является актуальной научно-технической задачей [3].

Математическая модель канала со структурными помехами

При математическом описании анализируемой радиоэлектронной ситуации входной эквивалент на входе демодулятора определяется аддитивной суммой полезного $s(t, r_c)$, $t \in [0, 1]$, $r_c = 0, \dots, M_c - 1$, прерывающегося помехового $s_n(t, r_n)$, $t \in [0, T]$, $r_n = 0, \dots, M - 1$ компонентов и гауссовского шума. Математическая модель на длительности тактового интервала задается выражением:

$$y(t) = s(t, r_c) + [s_n(t, r_n)\cos\varphi + \hat{s}_n(t, r_n)\sin\varphi] + n(t), \quad 0 \leq t \leq T, \quad (1)$$

где $y(t)$ – принимаемый радиосигнал на заданном временном интервале; $s(t, r_c)$ – полезный информационный сигнал при передаче одного из множества символов $r_c = 0, \dots, M_c - 1$; $s_n(t, r_n)$ – синхронная с полезным потоком структурная помеха ($r_n = 0, \dots, M_n - 1$); $\varphi \in [-\pi, \pi]$ – произвольный фазовый сдвиг помехи; $\hat{s}(t)$ – преобразование Гильберта для огибающей помехи. Величина $n(t)$ характеризует аддитивный белый гауссовский шум.

Величина $\delta \stackrel{\text{def}}{=} \delta_m = E_{c,m}/E_{n,m} = P_{c,m}/P_{n,m}$ есть отношение максимальной энергии (мощности) сигнала к максимальной энергии (мощности) помехи на длительности тактового интервала T сигнала в предположении, что сигнал и помеха имеют одинаковую длительность.

Если применяется прерывистая помеха, то ее средняя мощность, определенная на неограниченном временном интервале, равна $p_u(P_{n,m}/P_{n,m}^2)$, где

$P_{п,m}$ – максимальная энергия помехи; Π_n^2 – пик фактор помехи. С учетом этого среднее отношение мощностей сигнала и прерывистой помехи на входе демодулятора определяется как:

$$\delta_c = \frac{E_{c,ср}}{E_{п,ср}} = \frac{P_{c,ср}}{P_{п,ср}} = \frac{\Pi_n^2}{\Pi_c^2} \frac{1}{p_n} \frac{P_{c,m}}{P_{п,m}} = \frac{\Pi_n^2}{\Pi_c^2} \frac{1}{p_n} \delta \quad (2)$$

Прерывистое состояние мерцающего источника помехи формализуется вводом вероятности его скважности излучения $p_n \in [0,1]$. Анализ энергетических отношений основывается на введении параметра отношения сигнал/шум: $\gamma_{bc} = E_{bc}/N_0$, где γ_{bc} – отношение сигнал/шум в принимаемом сигнале; E_{bc} – средняя энергия, затрачиваемая на передачу одного бита информации; N_0 – односторонняя спектральная плотность мощности белого шума.

Вероятность ошибки в канале связи со взаимными помехами и АБГШ

Вычисление среднего коэффициента ошибок требует численного интегрирования условной битовой (символьной) вероятности по всем фазовым состояниям смещения описываемой плотностью распределения вероятности $f(\varphi)$ и вероятностью излучения p_n прерывистой помехи в канале связи. Таким образом вероятность ошибки определяется как:

$$\bar{P}_b(\gamma_{bc}, \delta_c, p_n) = \int_{-\pi}^{\pi} [p_n P_b(\gamma_{bc}, \delta, \varphi) + (1 - p_n) \tilde{P}_b(\gamma_{bc}, \delta = \infty, \varphi)] f(\varphi) d\varphi, \quad (3)$$

$\tilde{P}_b(\gamma_{bc}, \delta = \infty, \varphi)$ – вероятность ошибки системы связи только при наличии АБГШ (без воздействия структурных помех); $f(\varphi)$ – функция плотности распределения фазовой нестабильности помехи.

Пусть задан полезный сигнал – квадратурная амплитудная модуляция (КАМ-4) и на него воздействует белый шум, односторонняя спектральная плотность мощности которого N_0 , а также подобная сигналу прерывистая помеха двоичной фазовой (ФМ-2). В этом случае для помехи ФМ-2 очевидно, что пик фактор помехи $\Pi_n^2 = 1$, следовательно, $\delta = p_n \delta_c$ и средняя вероятность ошибки в первом и втором битах при произвольном фазовом сдвиге $\varphi_n \in [-\pi, \pi]$ равна:

$$\begin{aligned} P_{b1}(\gamma_{bc}, \delta, \varphi_n) &= G \left(\sqrt{\gamma_{bc}}, \sqrt{\frac{2\gamma_{bc}}{\delta}} \sin \varphi_n \right), \\ P_{b2}(\gamma_{bc}, \delta, \varphi_n) &= G \left(\sqrt{\gamma_{bc}}, \sqrt{\frac{2\gamma_{bc}}{\delta}} \cos \varphi_n \right), \end{aligned} \quad (4)$$

где $G(x, y) = ([Q(x + y) + Q(x - y)])/2$, а полная средняя вероятность битовой ошибки определяется как $P_b = (P_{b1} + P_{b2})/2$. С учетом (3) вероятность битовой ошибки может быть представлена в виде:

$$\begin{aligned} \bar{P}_b = (\gamma_{bc}, \delta, p) = & \frac{1}{2} \int_{-\pi}^{\pi} \left[F \left(\sqrt{2\gamma_{bc}}, \sqrt{\frac{2\gamma_{bc}}{\delta_c}} \sin \varphi_{\text{п}}, p_{\text{и}} \right) + \right. \\ & \left. + F \left(\sqrt{2\gamma_{bc}}, \sqrt{\frac{2\gamma_{bc}}{\delta_c}} \cos \varphi_{\text{п}}, p_{\text{и}} \right) \right] f(\varphi_{\text{п}}) d\varphi_{\text{п}}, \end{aligned}$$

где введена новая F – функция:

$$F(a, b, p) = \frac{1}{2} p [Q(a + b/\sqrt{p}) + Q(a - b/\sqrt{p})] + (1 - p)Q(a)$$

Указанная специальная функция позволяет формализовать усреднение при аналитическом моделировании для большого числа многопозиционных сигнальных конструкций КАМ-М и ФМ-М. Полученный механизм обеспечивает расчет на базе взвешенных алгебраических коэффициентов a, b , формируемых под каждый выбранный вид созвездия, заменяя итеративный численный процесс набором детерминированных алгебраических сумм, устойчиво выполняемых процессором в реальном времени.

Вычисление наихудшего параметра уязвимости радиолинии

Главная цель источника преднамеренной помехи заключается в максимизации средней вероятности битовой ошибки на приемной стороне. При фиксированной средней излучаемой мощности мешающий генератор может воздействовать на канал либо непрерывно (формируя слабый, но постоянный шумовой фон), либо сконцентрировать всю энергию в короткие и редкие пиковые импульсы (прерывистый режим). Следовательно, для объективной оценки надежности проектируемой системы связи необходимо вычислить такое оптимальное значение вероятности излучения помехи p_{opt} , при котором снижение качества приема достигнет своего теоретического максимума. Благодаря переходу к разработанной замкнутой функции вычисление данного параметра значительно упрощается. Поиск максимального значения вероятности ошибки осуществляется путем вычисления первой производной данной функции по параметру вероятности помехи и приравнивания ее к нулю. Это позволяет алгебраически определить самую высокую скважность подавления напрямую, избегая использования ресур-

соемких процедур перебора и обеспечивая быструю оценку уязвимости цифровой магистрали [3].

Оценка достоверности и практический таблично-графический анализ

Математическая модель, построенная на функциях $F(a, b, p_i)$, прошла оценку корректности (учитывая правило контроля ошибки не выше $\varepsilon \leq 2.5\%$) в специализированной имитационной программной платформе для широкого набора сигнальных конструкций КАМ-М / ФМ-М для различных величин отношения сигнал-шум γ_{bc} и отношения мощности сигнала к мощности помехи δ_c . Численный анализ (табл. 1, полученная аналитическим методом) отражает нелинейную зависимость вероятности ошибки на редкое появление сверхкоротких импульсов при больших отношениях γ_{bc} :

ТАБЛИЦА 1. Пример нахождения аналитических точек наивысшей уязвимости $p_{и, opt}$ для радиоканала (модуляция КАМ-4 при $r = 0, \gamma_{bc} = 9,588$ дБ)

Эффективное отношение сигнала к помехе δ_c^* , дБ	Наихудшая скважность (вероятность импульса помехи) p_{opt}	Экстремум средней вероятности ошибки (удар импульсом), P_b^{-max}	Значение вероятности ошибки при непрерывной сплошной помехе ($p = 1$)	Относительный рост ошибки
15	$3,623 \cdot 10^{-2}$	$7,662 \cdot 10^{-3}$	$1,475 \cdot 10^{-4}$	в 52 раза
20	$1,146 \cdot 10^{-2}$	$2,430 \cdot 10^{-3}$	$3,404 \cdot 10^{-5}$	в 71 раз

Анализ количественных показателей из табл. 1 в явном виде доказывает радиофизический механизм работы преднамеренных дискретных радиоэлектронных атак на приемные тракты КАМ-М. Если постановщик помех равномерно распределяет энергию подавления, формируя непрерывный спектр ($p = 1$), то демодулятор, несмотря на воздействие помехи с запасом по энергии в $\delta_c = 20$ дБ, способен удержать качество передачи данных на достаточно приемлемом уровне $\bar{P}_b \approx 3,4 \cdot 10^{-5}$. Однако при применении стратегии структурного импульсного удара (когда мешающее устройство затихает и концентрирует эту же среднюю мощность в ультракороткий пиковый пакет с расчетной скважностью $p_{opt} = 1,1 \cdot 10^{-2}$, приемная аппаратура полностью лишается возможности достоверной оценки символов на локальных участках сетки. Вероятность сбоя тракта многократно возрастает, 10^{-3} (ухуд-

шение характеристик детектирования более чем в 70 раз при абсолютно идентичной средней энергозатратности генератора помех). Математическое отслеживание данного пика p_{opt} посредством выведенных выше дифференцируемых уравнений на базе F -функций исключает применение эмпирического тестирования и позволяет проектировать фильтры для купирования данных узких импульсных провалов.

Архитектура программно-имитационного комплекса в среде Simulink

Для эмпирического подтверждения результатов аналитических расчетов разработана многопоточная имитационная блок-схема в среде визуального проектирования Simulink [4]. Разработанный радиотехнический тракт концептуально разделен на три узла: формирования полезного сообщения, синтеза структурной помехи и приемного демодулирующего комплекса с подсистемой анализа. Структурная схема имитационной модели приема сигналов в условиях совместного воздействия АБГШ и прерывистой структурной помехи представлена на рис. 1

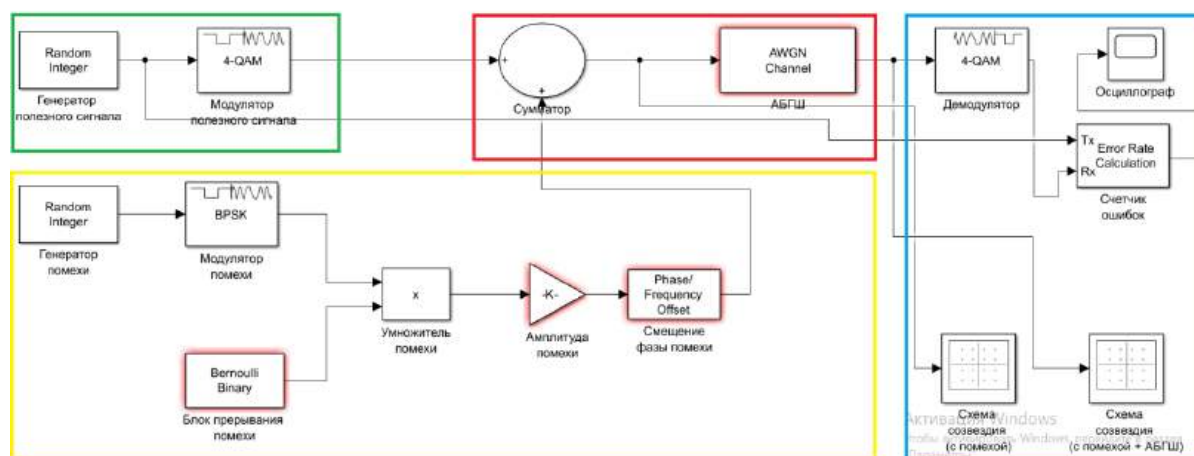


Рис. 1. Структурная схема имитационной модели приема сигналов в условиях совместного воздействия АБГШ и прерывистой структурной помехи

Тракт формирования полезного сигнала строится на основе источника равновероятных целочисленных элементов с их последующим фазо-амплитудным кодированием по правилу Грея в созвездие КАМ-4. Базис формирования структурной помехи идентичен (синхронен по тактовой частоте), однако для обеспечения условия (подобной сигналу) структуры применяется модулятор фазовой манипуляции ФМ-2. Реализация режима прерывистого характера достигается включением в цепь амплитудного умножителя и би-нарного генератора случайных чисел с распределением Бернулли, вероят-

ность возникновения единичного элемента в котором задается параметром скважности $p \in [0,1]$. Формирование радиоэлектронного конфликта на физическом уровне (смещение в эфирной среде) реализовано в виде аддитивного матричного сумматора полезной несущей и мешающего импульсного радиосигнала, имеющего псевдослучайный временной фазовый сдвиг $\varphi \in [-\pi, \pi]$, формируемый блоком равномерного распределения. Итоговое отношение пиковых энергетик устанавливается балансировкой соответствующих масштабных коэффициентов, пропорциональных значению δ_c . Комплексный белый шум добавляется к объединенному массиву блоком АБГШ. Анализ качества связи выполняется цифровым квадратурным детектором, выходы которого заведены на счетчик битовых ошибок, осциллограф, устройство, выводящее схема рассеяния сигнального созвездия. Результаты выполнения алгоритма отражены на рис. 2.

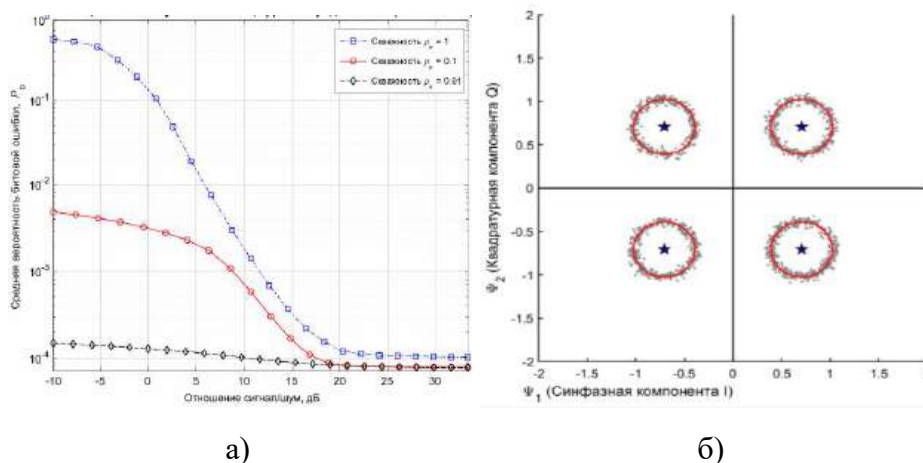


Рис. 2. Результаты математического и имитационного моделирования помехоустойчивости КАМ-4: а) оценка помехоустойчивости цифрового радиоканала (КАМ-4/ФМ-2); б) схема рассеяния сигнального созвездия сигнала КАМ-4 при воздействии на него взаимной помехи ФМ-2 и АБГШ.

Заключение

Разработан универсальный алгоритм вычисления ошибок линейного цифрового демодулятора под воздействием аддитивной прерывистой помехи и тепловых шумов АБГШ. Математический переход к аппарату аналитических F -модификаций для Q -функции (интеграла вероятностей) обеспечил высокую точность оценки радиотракта. Настоящая математическая модель устраняет компромиссы имитационного моделирования в вопросе машинных лимитов в областях высокой надежности, что важно при плани-

ровании надежной транзитной инфраструктуры телекоммуникаций современных многопозиционных сигналов КАМ-М.

Список используемых источников

1. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. – М.: Вильямс, 2003. 1104 с.
2. Proakis J. G., Salehi M. Digital Communications. 5th ed. – McGraw-Hill Education, 2007.
3. Савищенко Н. В. Специальные интегральные функции, применяемые в теории связи: Монография. СПб.: ВАС, 2012. 560 с.
4. Типикин А. А. Моделирование систем связи в MATLAB с помощью пакета расширения Communications Toolbox. СОЛОН-Пресс, 2022, 340 с.

ANALYTICAL AND SIMULATION MODELING OF 4-QAM RECEPTION ERROR PERFORMANCE UNDER COMBINED AWGN AND PULSED STRUCTURAL BPSK JAMMING

Galkina M.¹, Pelin A.², Savischenko N.²

¹Siberian State University of Telecommunications and Informatics

²Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S. M. Budyonny

This paper investigates the noise immunity of coherent digital signal reception under the combined influence of AWGN and pulsed structural jamming. The novelty of the research lies in deriving closed-form analytical expressions for the bit error probability without the use of stochastic numerical integration. A specific mathematical framework has been synthesized to find the optimal jamming probability (duty cycle) that causes the maximum degradation of the communication link. This approach effectively eliminates the need for time-consuming computer simulations of radio channels.

Key words: noise immunity, structural jamming, pulsed emission, signal-to-noise ratio, closed-form expressions, intentional interference, digital radio links

УДК 535
ГРНТИ 29.31**МОДЕЛИРОВАНИЕ КОРРЕЛЯЦИОННОГО ОТДР
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОДОВ
НА ОСНОВЕ МАТРИЦЫ АДАМАРА****С. Ф. Глаголев, А. А. Поздняков**

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Рассматривается модель корреляционного оптического рефлектометра для контроля волоконно-оптической линии передачи. В качестве зондирующих воздействий использованы последовательности, сформированные на основе строк матрицы Адамара. Показано, что взаимная ортогональность таких последовательностей позволяет разделять отклики линии после корреляционной обработки. В работе описаны принципы построения матриц, схема моделирования прохождения кодированных сигналов по линии с отражающими неоднородностями и способ восстановления рефлектограммы. Полученные результаты подтверждают применимость кодов Адамара для имитационного исследования корреляционного метода рефлектометрии. Предложенная модель может использоваться для дальнейшего сравнения разных семейств кодовых последовательностей.

оптическая рефлектометрия, корреляционная обработка, матрица Адамара, кодовая последовательность, волоконно-оптическая линия передачи

Волоконно-оптические линии передачи требуют регулярного контроля состояния, так как локальные неоднородности, соединения, изгибы и повреждения изменяют распределение обратного рассеяния и отражений вдоль трассы. Для решения этой задачи широко применяется оптическая рефлектометрия во временной области. Типовой оптический рефлектометр формирует короткий зондирующий импульс, регистрирует принятый отклик и по задержке сигнала определяет положение события в линии. Такой подход удобен при эксплуатации, однако его характеристики ограничиваются энергией одиночного импульса, динамическим диапазоном приемного тракта и требуемым пространственным разрешением.

Одним из направлений повышения информативности измерений является корреляционный метод. Вместо одиночного импульса в линию передается кодированная последовательность, а принятый сигнал обрабатывается с использованием корреляции с известным зондирующим кодом [1, 2]. В результате становится возможным увеличить энергию зондирования без пропорционального ухудшения разрешения. При этом качество восстановления

рефлектограммы существенно зависит от корреляционных свойств выбранной последовательности. Поэтому задача моделирования корреляционного оптического рефлектометра и проверки кодов, пригодных для разделения откликов от разных участков линии актуальна.

Цель работы состоит в построении модели корреляционного оптического рефлектометра, в которой зондирующие последовательности формируются на основе матрицы Адамара, а положение отражающих неоднородностей определяется по результату корреляционной обработки. В отличие от коммерчески распространенных решений, корреляционные схемы остаются предметом активных исследований, поскольку требуют выбора кодов, настройки алгоритма обработки и оценки влияния параметров линии.

Матрица Адамара представляет собой квадратную матрицу H_n порядка n , элементы которой принимают значения $+1$ и -1 , а строки взаимно ортогональны. Это свойство записывается в виде (1):

$$H_n H_n^T = n I_n \quad (1)$$

где I_n – единичная матрица порядка n . Матрицы порядка 2^m могут быть построены рекурсивно [3] (2):

$$H_1 = [1], \quad H_{2n} = \begin{bmatrix} H_n & H_n \\ H_n & -H_n \end{bmatrix} \quad (2)$$

Например, для порядка 4 получается набор из четырех ортогональных строк (3):

$$H_4 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Каждая строка такой матрицы может рассматриваться как отдельная зондирующая последовательность. В физической схеме значения $+1$ и -1 интерпретируются как два состояния кодирования оптического сигнала, а в расчетной модели используются для последующей корреляционной обработки.

Последовательности, соответствующие строкам матрицы Адамара, поочередно подаются в линию. Для каждой передачи формируется отклик, содержащий вклад обратного рассеяния и отражения от неоднородностей. Затем принятый сигнал сворачивается с соответствующей кодовой последовательностью, после чего частные корреляционные отклики суммируются.

В ходе моделирования были получены частные корреляционные функции для строк матрицы Адамара и итоговая сумма корреляций. Частные

функции имеют различный вид, поскольку каждая строка задает собственную структуру зондирующего сигнала. При суммировании проявляется основное преимущество ортогонального набора: отклики согласуются в точках, соответствующих событиям на трассе, а побочные составляющие взаимно компенсируются [4].

На рис. 2 и 3 показаны примеры результата корреляционной обработки и полученных откликах в линии соответственно. Наличие сильного отклика с отсутствием боковых пиков после основного изменения показывает, что вклад побочных составляющих снижен. Тем самым подтверждается принципиальная возможность восстановления рефлектограммы с использованием ортогональных последовательностей Адамара.

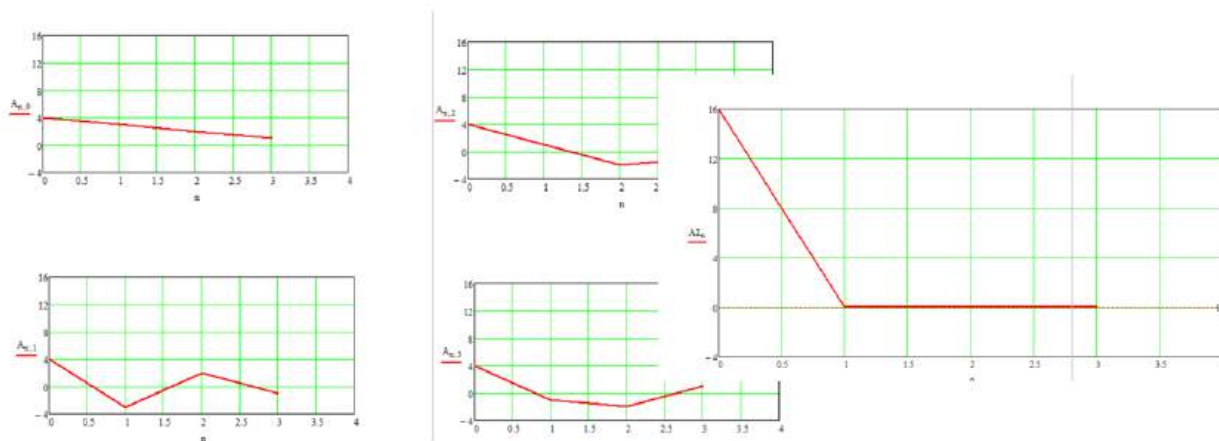


Рис. 1. Результаты автокорреляционной функции для матрицы 4x4

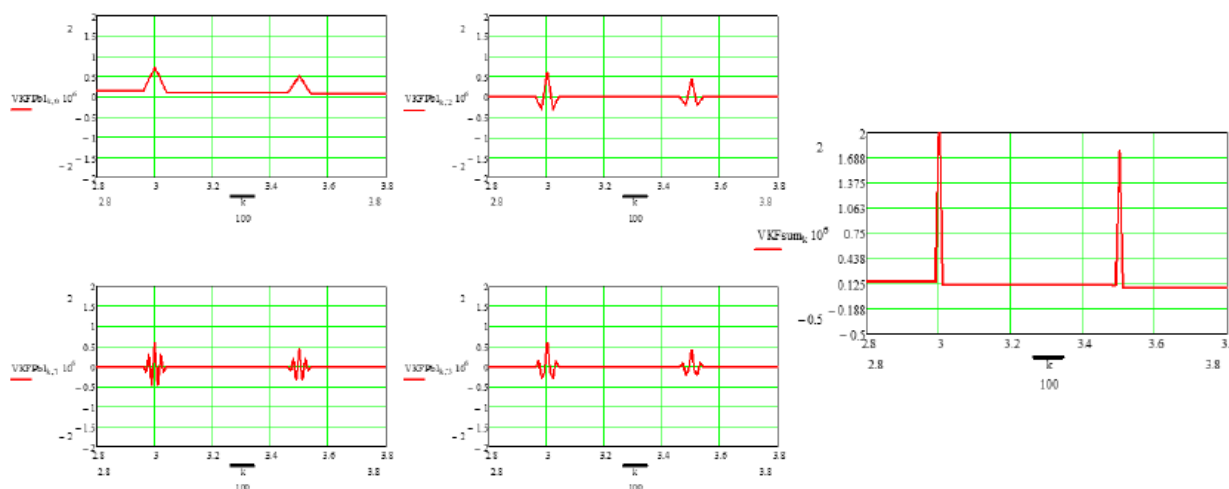


Рис. 2. Полученные результаты для матрицы 4x4

Результаты моделирования подтверждают, что разработанная модель воспроизводит основные этапы работы корреляционного рефлектометра. В ней реализованы формирование кодированного зондирующего сигнала, получение отклика линии, расчет частных корреляционных функций и построение результирующей рефлектограммы.

Матрицы Адамара оказались удобной основой для построения зондирующих последовательностей благодаря ортогональности их строк и возможности рекурсивного увеличения порядка. За счет этого число используемых кодов можно последовательно наращивать и оценивать, как длина последовательности влияет на выявление неоднородностей в линии.

Разработанная модель может служить расчетной платформой для сопоставления различных способов кодирования зондирующего сигнала. На ее основе можно провести сравнительный анализ последовательностей Адамара, Баркера, Голея, псевдослучайных кодов и других вариантов. Отдельный интерес представляет проверка модели на реальной волоконно-оптической линии. В таком эксперименте потребуется учесть шум приемника, нестабильность оптического источника, ограничение полосы пропускания измерительного тракта и фактические коэффициенты отражения соединительных элементов.

В рамках работы была создана модель корреляционного оптического рефлектометра, использующего зондирующие последовательности, сформированные по матрицам Адамара. Проведенный корреляционный анализ показал, что такие последовательности позволяют восстанавливать отклик волоконно-оптической линии. Полученные результаты обосновывают дальнейшее исследование кодов Адамара применительно к корреляционной рефлектометрии, а также их использование при совершенствовании алгоритмов диагностики оптических трасс.

Список используемых источников

1. Jones M. D. Using simplex codes to improve OTDR sensitivity // IEEE Photonics Technology Letters, July 1993. Vol. 5. N 7. PP. 822-824.
2. Nazarathy M., Newton S. A., Giffard R. P., Moberly D. S., Sischka F., Trutna W. R., Foster S. Real-time long range complementary correlation optical time domain reflectometer // Journal of Lightwave Technology. 1989. Vol. 7. PP. 24–38.
3. Sylvester J. J. Thoughts on inverse orthogonal matrices, simultaneous sign successions, and tessellated pavements in two or more colours, with applications to Newton's rule, ornamental tile-work, and the theory of numbers // The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science. 1867. Vol. 34. PP. 461–475.
4. Nazarathy M., Newton S. A., Trutna W. R. Complementary correlation OTDR with three codewords // Electronics Letters. 1990. Vol. 26. PP. 70–71.

**MODELING OF CORRELATION OTDR
USING HADAMARD MATRIX-BASED CODES**

Glagolev S., Pozdnyakov A.

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

A model of a correlation optical reflectometer for monitoring fiber-optic transmission lines is considered. Sequences formed based on Hadamard matrix rows are used as probing signals. It is shown that the mutual orthogonality of such sequences allows for the separation of line responses after correlation processing. The paper describes the principles of matrix construction, a scheme for simulating the propagation of coded signals along a line with reflective inhomogeneities, and a method for reconstructing reflectograms. The obtained results confirm the applicability of Hadamard codes for simulation studies of the correlation reflectometry method. The proposed model can be used for further comparison of different families of code sequences.

Key words: *optical reflectometry, correlation processing, Hadamard matrix, code sequence, fiber-optic transmission line*

УДК 621.39

ГРНТИ 20.51.19

**ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ СВЯЗИ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ:
ТРАЕКТОРИИ РАЗВИТИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ****Д. С. Гладких, Н. К. Перова, Ф. Д. Хлопунов**

Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного

Оптические системы связи переживают парадигмальный сдвиг: от эволюционного роста скоростей – к трансформации архитектуры и физических принципов. Основные тенденции: рекордное сжатие циклов обновления, переход от максимизации пропускной способности к энергоэффективности, глубокая интеграция фотоники и электроники, освоение полых световодов и межспутниковых лазерных линий. Также наблюдаются гибридизация классической и квантовой связи, формирование космическо-наземных сетей и смещение фокуса на системную архитектуру. Российский сегмент развивается в условиях ограничений, делая ставку на надежность и информационную безопасность. Перспективы определяются энергоэффективностью, коммерциализацией полых волокон и гибридными квантово-классическими инфраструктурами.

оптические системы связи, когерентная оптика, совместно упакованная оптика, полые оптические волокна, энергоэффективность, квантовые коммуникации, космическая оптическая связь

Современные оптические системы связи переживают период фундаментальной трансформации, выходящей за рамки традиционной эволюции скоростных характеристик. Отрасль столкнулась с парадигмальным сдвигом, обусловленным сближением распределенных вычислительных платформ, развитием квантовых технологий и формированием космическо-наземной инфраструктуры. Если ранее развитие оптических сетей определялось исключительно требованием к наращиванию пропускной способности, то сегодня основными показателями являются энергоэффективность, архитектурная гибкость, физическая интеграция компонентов и безопасность передачи данных [1-3]. Систематизируются ключевые технологические векторы, физико-технические основы и оценивается траекторию развития российского сегмента в условиях внешних ограничений.

Одной из заметных характеристик стало рекордное сжатие технологических циклов. Внедрение 400-гигабитных систем завершилось к 2022 г., коммерциализация решений 800G состоялась в 2023-2024 гг., а первые про-

мышленные поставки платформ 1,6Т начались в 2025-2026 гг. Главным драйвером этого ускорения выступил переход от задач широкополосного доступа к требованиям межсоединений в ИИ-кластерах. В современных вычислительных массивах соотношение вычислительной мощности к пропускной способности каналов изменилось с 10:1 до 1:1-3:1, превратив оптические интерфейсы из периферийного элемента в основной узел, определяющий общую производительность системы. Пришлось отказаться от поэтапных стандартов – сразу переходить на высокие скорости, быстро подстраивая инфраструктуру.

Границы между фотонными и электронными системами постепенно исчезают: их объединяют и по устройству, и по работе. Развитие идет в два шага. На первом – кремниевая фотоника: на одной кремниевой пластине вместе с управляющими схемами размещают модуляторы, фотодетекторы и волноводы. Эта технология уже закрепилась в оптических трансиверах: устройства стали компактнее и надежнее, потому что ушли от сборки из отдельных деталей [4]. Второй шаг – оптика в общей упаковке: оптические элементы ставят в одном корпусе с вычислительным чипом, вплотную к нему. Длина электрических соединений падает с десятков сантиметров до нескольких миллиметров – это заметно уменьшает потери, помехи между сигналами и расход энергии, дает скорость до 200 ГБод на линию. Такой путь похож на историю микроэлектроники: от отдельных деталей к объединенным и цельным решениям.

Архитектура оптических сетей заметно меняется. Вместо жестких схем все чаще используют гибкие гибридные платформы – они подстраиваются под нагрузку и состояние канала. Это проявляется в нескольких вещах: параметры модуляции меняют на лету – от простой к более плотной, смотря на качество сигнала и длину участка; одна инфраструктура тянет сразу разные задачи: и потоки с минимальной задержкой для финансовых операций, и мощные каналы для распределенных вычислений; системы сами настраивают работу – алгоритмы в реальном времени подбирают компенсацию искажений, мощность передатчика и маршрут. Так проектирование уходит от жестко заданных решений к гибким, управляемым программами архитектурам.

Отдельно осваивают новые среды передачи. В полых волокнах сердечник заполнен воздухом или газом – там сигнал идет почти со скоростью света в вакууме, нелинейность ниже на 30–40 %, а диапазон частот шире, чем у обычного кварцевого стекла. Если такие волокна начнут массово при-

менять, появятся очень быстрые линии через континенты и сети для высокочастотной торговли [5]. Параллельно растет сегмент лазерных линий между спутниками – они дают десятки гигабит на расстояниях в тысячи километров. Чтобы связать космос и землю, нужно точно наводить луч, отслеживать его и компенсировать искажения из-за атмосферы, но именно такие гибридные сети станут опорой глобальной связи, когда наземные каналы будут перегружены.

Еще одно важное направление – совмещение обычных и квантовых способов передачи данных. Когда в одну линию пытаются пустить и мощные классические сигналы, и одиночные фотоны для квантового распределения ключей (QKD), возникают помехи. Их убирают разделением по спектру, времени и поляризации, а еще создают совместимые усилители и фильтры. Одновременно разрабатывают стандарты для квантовых повторителей и доверенных узлов – это приближает появление защищенной на квантовом уровне глобальной сети.

В России оптические коммуникации развиваются при технологических ограничениях, и из-за этого путь отрасли особый [6]. Делают упор на объединение систем, но по-прежнему зависят от поставок ключевых деталей: лазеров, быстрых модуляторов, приемников и специальных чипов. В ответ ставку делают на узкие ниши, где важнее не максимальная скорость, а надежность, защита данных и независимость поставок. В науке активно работают с фотонными схемами, метаповерхностями и нанофотоникой, но между лабораторными образцами и массовым выпуском остается разрыв. Перспективнее всего сосредоточиться на защищенных сетях для особых задач, терминалах космической связи и квантовых каналах для критически важных объектов – там главные требования: безопасность и технологический суверенитет.

Анализ показывает три главных вектора: вместо гонки за скоростью все чаще считают энергозатраты; фотонные и электронные части все плотнее собирают в единую систему; вместо жестких решений выбирают гибкие гибридные платформы. Это и есть логика развития технологий – от узко заточенных систем к универсальным, экономным и управляемым программно. Российский сегмент, действуя в ограниченных условиях, идет своим путем и делает ставку на решения с высокой степенью защиты и автономности. Чтобы оставаться конкурентоспособными, важно сохранять научный задел в фотонике, быстрее внедрять разработки в производство и создавать свои стандарты – для этого нужна согласованная работа и государства, и отрасли.

Список использованных источников

1. Shehata M., Wang Y., He J., Kandeepan S., and Wang K. Optical and terahertz wireless technologies: The race to 6G communications // IEEE Wirel. Commun. 2023. Vol. 30. N 5. PP. 10–18.
2. Maraqa O. and Ngatched T. M. Optimized design of joint mirror array and liquid crystal-based RIS-aided VLC systems // IEEE Photonics Journal, 2023.
3. Munshi M. N., Maret L., Racine B., Fischer A. P. A., Chakaroun M., and Loganathan N. 2.85-Gb/s organic light communication with a 459-MHz micro-OLED // IEEE Photonics Technology Letters, 2023. Vol. 35. N 24. PP. 1399–1402.
4. Zhang X., Jiang J., Feng B., Song H., and Shen L. Organic photodetectors: Materials, device, and challenges // Journal of Materials Chemistry C, 2023. Vol. 11. N 37. PP. 12 453–12 465.
5. Ahmad R., Kazemi H., Sarbazi E., and Haas H. Joint Position and Orientation Estimation in VCSEL-Based LiFi Networks: A Deep Learning Approach // in IEEE Global Commun. Conf. (GLOBECOM). IEEE, 2023. PP. 3676–3681.
6. Nicholls J., Anderson L., Lee W., Ahn J. J. S., Baskaran A., Bang H., Bellocil M., Cai Y., Campbell J., Chai J., Corpuz N., Entoma V., Hayden B., Hung T., Kim H., King D., Li S., Liu A., McMahon D., Nguyen V., Pan S. F., Tedman-Jones S., Toe W. J., Tsai R., Tudo M. P., Wang H. P., Wang Y., Yan S., Yang R., Yeo K., Schaff W., Krause N., Charters R., Tang J., and Atanackovic P. High performance and high yield sub-240 nm AlN:GaIn short period superlattice LEDs grown by MBE on 6 in. sapphire substrates // Appl. Phys. Lett., Aug. 2023. Vol. 123. PP. 051105.

Статья представлена научным руководителем, профессором кафедры автоматизированных систем специального назначения ВАС, доктором технических наук, профессором И. Б. Саенко.

NEXT-GENERATION OPTICAL COMMUNICATION SYSTEMS: TRAJECTORIES AND PROSPECTS

Gladkikh D., Perova N., Khlopunov F.

Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S. M. Budyonny

Modern satellite communication systems are a critical element of the global telecommunications infrastructure, providing coverage in the absence of terrestrial networks, rapid response to emergencies, and support for strategic industries. Key use cases include backbone and terminal communications, critical infrastructure redundancy, support for mobile and maritime aviation, and integration with IoT networks. Special attention is given to the methodology for evaluating efficiency, which includes technical parameters, economic indicators, and operational sustainability. The limitations associated with the availability of orbital frequency resources, the risks of space debris formation, technological dependencies, and climate factors are also discussed.

Key words: *satellite communications, low-orbit groupings, system efficiency, orbital frequency resource, inter-satellite lines*

УДК 621.396.94

ГРНТИ 20.51.19

СОВРЕМЕННЫЕ СРЕДСТВА СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ И ИХ ИНФРАСТРУКТУРНЫЙ РЕСУРС

Д. С. Гладких, Н. К. Перова, Ф. Д. Хлопунов

Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного

Современные средства спутниковой связи выступают критически важным элементом глобальной телекоммуникационной инфраструктуры, обеспечивая покрытие в условиях отсутствия наземных сетей, оперативное реагирование на чрезвычайные ситуации и поддержку стратегических отраслей. Ключевые сценарии использования: магистральной и терминальной связи, резервирование критической инфраструктуры, поддержка мобильной и морской авиации, а также интеграция с IoT-сетями. Особое внимание уделено методологии оценки эффективности, включающей технические параметры, экономические показатели и операционную устойчивость. ограничения, связанные с загруженностью орбитально-частотного ресурса, рисками образования космического мусора, технологической зависимостью и климатическими факторами.

спутниковая связь, низкоорбитальные группировки, эффективность систем, орбитально-частотный ресурс, межспутниковые линии

Современные средства спутниковой связи перестали быть исключительно резервным каналом или инструментом для удаленных территорий. Экономика переходит на цифру, данных становится больше, обстановка в мире обостряется – и спутниковые сети из вспомогательного канала связи выросли в опору, на которой держатся живучесть инфраструктуры, скорость принятия решений и независимость от чужих технологий. За последние 10 лет облик таких сетей резко изменился: на смену одиночным аппаратам на геостационарной орбите (ГСО, 36 000 км) пришли роевые группировки на низких (500–1200 км) и средних орбитах. ГСО-спутник дает устойчивое пятно покрытия и мощный луч, но сигнал идет до него 250–300 мс в 1 сторону, а полоса на 1 абонента мала. Для живого обмена данными и подстраховки наземных магистралей этого мало. Низкоорбитальный рой из сотен и тысяч аппаратов сокращает задержку до 20–50 мс – почти как у оптоволокна на земле. При этом их архитектура требует сложной координации частот, постоянной стыковки с наземными станциями и развития межспутниковых линий связи для минимизации зависимости от наземной ин-

фраструктуры. Гибридные топологии, объединяющие GEO, MEO и LEO в единую оркестрируемую сеть, становятся стандартом де-факто для операторов, стремящихся обеспечить бесперебойный сервис при изменении нагрузки и внешних угроз [1-4].

Применение спутниковой связи охватывает несколько значимых областей. Во-первых, это обеспечение связью удаленных и труднодоступных регионов, где прокладка наземных линий экономически нецелесообразна или физически невозможна. В арктических, горных и островных зонах спутниковые терминалы выступают единственным каналом передачи голосового трафика, телеметрии и данных мониторинга. Во-вторых, спутниковые сети выполняют функцию аварийного резервирования критической инфраструктуры: энергетических объектов, финансовых центров, государственных систем управления и здравоохранения. При повреждении наземных магистралей вследствие стихийных катастроф или техногенных инцидентов LEO-терминалы развертываются за минуты, восстанавливая управляемость объекта. В-третьих, интеграция спутниковой связи с мобильными платформами (морские суда, воздушные суда, железнодорожный транспорт) обеспечивает непрерывность обмена данными. Современные авиационные и морские антенны с электронным сканированием (ESA/Phased Array) позволяют поддерживать сеансы связи при высокой скорости и изменении ориентации. В-четвертых, спутниковые каналы активно используются для поддержки IoT-сетей в логистике, сельском хозяйстве и мониторинге окружающей среды, где требуются низкая пропускная способность, но высокая надежность и глобальное покрытие.

Оценка эффективности спутниковых систем в современных условиях требует многокритериального подхода. Техническая эффективность измеряется через коэффициент готовности системы, спектральную эффективность (бит/с/Гц), задержку распространения сигнала и устойчивость к атмосферным затуханиям (дождь, ионосферные возмущения). Экономическая эффективность определяется совокупной стоимостью владения, включающей стоимость терминалов, абонентской платы, развертывания наземных шлюзов и эксплуатации. Операционная эффективность оценивается по времени развертывания, адаптивности к изменению трафика, уровню автоматизации управления лучами и совместимости с наземными сетями (3GPP NTN, 5G Non-Terrestrial Networks). Главная мера эффективности здесь – доля полезно задействованного орбитально-частотного ресурса. Она растет

с плотностью группировки, с умным повторным использованием частот и с гибкой раздачей емкости туда, где она нужна прямо сейчас.

Но на практике спутниковая связь упирается в жесткие рамки. Низкие и средние орбиты перегружены: риск столкновений растет, копится космический мусор. Без автоматики уклонения и без правил МСЭ тут не обойтись. Частоты в полосах Ka/Ku/Q/V на исходе – особенно над экватором и в густо застроенных городах. Приходится лезть выше по спектру и ставить адаптивные фильтры помех. Дождь, вспышки на Солнце, неоднородности ионосферы ломают сигнал нелинейно; лечат это помехоустойчивыми кодерами-декодерами и заблаговременным прогнозом состояния канала. Еще 1 острый риск – зависимость от чужой элементной базы: СВЧ-усилители, специализированные микросхемы для обработки сигналов, радиационно-стойкие компоненты. У многих стран своих просто нет. Добавим сюда лицензирование частот, правила хранения данных внутри страны, запреты на вывоз терминалов – и глобальный рост сервисов тормозит [5–7].

В России спутниковую связь строят с оглядкой на 2 задачи: обойтись без импорта и не потерять управляемость. Основные ставки – многоспутниковая система «Сфера», обновленные «Экспрессы» на ГСО и «Гонец» для подвижной связи и сетей датчиков. Вместо закупок чужих терминалов делают свои антенные комплексы, отечественные процессоры формирования лучей и перестраиваемые прямо на орбите полезные нагрузки: покрытие и частотный план можно менять, не спуская аппарат. Отдельная линия – сшивка спутниковых каналов с наземными сетями 5G/6G через единые интерфейсы не наземного доступа, чтобы телефон или датчик переключался между вышкой и спутником без разрыва сессии. При этом отечественные системы судят не по пиковой скорости, а по-другому: выдержат ли внешнее давление, не встанут ли из-за разрыва поставок, смогут ли тянуть критическую инфраструктуру, если наземные сети легли [8].

Перспективы развития спутниковой связи определяются тремя взаимодополняющими направлениями. Во-первых, переход к программно-определяемым спутникам с динамическим формированием лучей и оркестровкой ресурсов на базе ИИ-алгоритмов позволит оптимизировать пропускную способность под реальный спрос без замены аппаратной части. Во-вторых, развитие оптических межспутниковых линий связи (laser ISL) обеспечит создание автономных орбитальных магистралей, независимых от наземных шлюзов, что критически важно для глобального покрытия и снижения задержек в полярных и океанических зонах. В-третьих, конвергенция спутни-

ковых и наземных сетей в рамках архитектуры 5G-Advanced/6G Non-Terrestrial Networks сформирует единую среду доступа, где выбор канала (территориальный, спутниковый, воздушный) будет определяться динамически на основе условий канала, стоимости и требований безопасности.

Практическое применение средств спутниковой связи демонстрирует их трансформацию из вспомогательного канала в стратегический инфраструктурный элемент. Эффективность современных систем определяется не только техническими характеристиками, но и архитектурной гибкостью, устойчивостью к внешним угрозам, экономической целесообразностью и уровнем технологического суверенитета. Переход к гибридным орбитальным топологиям, внедрение программно-определяемых полезных нагрузок и развитие межспутниковых лазерных каналов открывают новые возможности для глобальной связности. Российский сегмент, концентрируясь на надежности, автономности и интеграции с наземными сетями, формирует устойчивую траекторию развития, соответствующую национальным приоритетам. Дальнейшее повышение эффективности требует системного подхода, объединяющего научные исследования, промышленное производство, нормативное регулирование и международное сотрудничество в рамках многосторонних инициатив.

Список использованных источников

1. Yang G H, He G N, Chen R R, et al. Progress and prospect of 6G wireless air-interface transmission technology research (in Chinese) // Sci Sin Inform, 2024, 54: 1078–1113.
2. Yu N. Y., Yu W. Joint activity and data detection for massive grant-free access using deterministic non-orthogonal signatures. IEEE Trans Wireless Commun, 2024, 23: 9474–9482.
3. Gao Z., Ke M., Mei Y., et al. Compressive-sensing-based grant-free massive access for 6G massive communication // IEEE Int Things J, 2024, 11: 7411–743.
4. Luo Q., Xiao P., Liu Z., et al. AFDM-SCMA: a promising waveform for massive connectivity over high mobility channels. IEEE Trans Wireless Commun, 2024, 23: 14421–14436.
5. Zhang C., Liu Y., Hu J., et al. Joint user identification, channel estimation, and data detection for grant-free NOMA in LEO satellite communications // IEEE J Sel Areas Commun, 2025, 43: 107–121.
6. Shen B., Wu Y., Zhang W., et al. LEO satellite-enabled random access with large differential delay and Doppler shift // IEEE Trans Wireless Commun, 2025, 24: 2876–289.
7. Le T. T. T., Hassan N. U., Chen X., et al. A survey on random access protocols in direct-access LEO satellite-based IoT communication // IEEE Commun Surv Tut, 2025, 27: 426–462.
8. Wang W., Chen T., Ding R., et al. Location-based timing advance estimation for 5G integrated LEO satellite communications // IEEE Trans Veh Technol, 2024, 73: 1123–1134.

Статья представлена научным руководителем, профессором кафедры автоматизированных систем специального назначения ВАС, доктором технических наук, профессором И. Б. Саенко.

NEXT-GENERATION OPTICAL COMMUNICATION SYSTEMS: TRAJECTORIES AND PROSPECTS

Gladkikh D., Perova N., Khlopunov F.

Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union
S. M. Budyonny

Modern satellite communication systems are a critical element of the global telecommunications infrastructure, providing coverage in the absence of terrestrial networks, rapid response to emergencies, and support for strategic industries. Key use cases include backbone and terminal communications, critical infrastructure redundancy, support for mobile and maritime aviation, and integration with IoT networks. Special attention is given to the methodology for evaluating efficiency, which includes technical parameters, economic indicators, and operational sustainability. The limitations associated with the availability of orbital frequency resources, the risks of space debris formation, technological dependencies, and climate factors are also discussed.

Key words: *satellite communications, low-orbit groupings, system efficiency, orbital frequency resource, inter-satellite lines*

УДК 621.396.712

ГРНТИ 49.43.37

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ БЛОКА ЧАСТОТНОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ ПРИЕМНОГО ОБОРУДОВАНИЯ СИСТЕМЫ DRM

О. А. Гуминский, Ю. А. Ковалгин

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Приведены результаты разработки и реализации метода частотной синхронизации, включающие блоки оценки и компенсации частотного сдвига OFDM-сигнала, оценена эффективность его работы в составе имитационной модели приемопередающего тракта системы DRM.

синхронизация OFDM-сигнала, цифровое радиовещание, DRM

Введение

Общеизвестно, что в системах с OFDM-передачей для обеспечения надежного приема частоты и фазы несущего колебания и тактовых генераторов передающего и приемного трактов должны поддерживаться в требуемых пределах в течение всего времени передачи, что невозможно выполнить без синхронизации приемопередающего оборудования.

Расстройка по частоте OFDM-сигнала приводит к появлению интерференции между поднесущими частотами (ИМП) и, как следствие, к ухудшению отношения сигнал/шум. Обычно расстройку приемного и передающего оборудования по частоте Δf_1 нормируют по отношению к расстоянию между поднесущими частотами Δf , т.е. определяют как $\varepsilon = (\Delta f_1 / \Delta f)$. При целом значении этого отношения ИМП отсутствует, но имеет место поворот их фазы. При дробном значении, когда $\varepsilon < 1/2$, появляется ИМП, весьма существенная даже при малом значении ε [1]. Например, для системы DRM при работе в режиме устойчивости Е в случае стационарного приема F_x и модуляции поднесущих частот QAM-4 прием OFDM-сигнала становится невозможным уже при $\varepsilon = 0,5 \%$, что дает значение $\Delta f_1 = 2,22$ Гц [2]. При $\varepsilon > 1/2$ имеет место неопределенность в оценке фазы.

Изменение амплитуды и фазы поднесущих частот OFDM-символов может быть обусловлено следующими причинами:

- наличием фазового шума; генератор не вырабатывает колебание строго на одной частоте, всегда есть некоторое изменение ее во времени, в этом случае можно говорить о модуляции этого колебания случайным сигналом, в результате мгновенная частота, являющаяся производной по времени, не остается постоянной, вызывая ИМП;
- уходом несущей (центральной) частоты (CFO – Carrier Frequency Offset) радиоканала, которая приводит к повороту фазы поднесущих частот OFDM-сигнала, к смещению самих поднесущих частот при старте прямого дискретного преобразования Фурье (ДПФ);
- расстройкой частоты и фазы тактовых генераторов передающего и приемного оборудования при дискретизации OFDM-сигнала (SCO – Sampling Clock Offset), что приводит к изменению амплитуды и повороту фазы поднесущих частот при радиоприеме.

Схемы синхронизации решают две задачи: захват и слежение. Захват обеспечивает грубую оценку, слежение – это непрерывный процесс, в течение которого грубая оценка непрерывно уточняется для достижения приемлемой (требуемой) точности.

Частотная синхронизация обычно выполняется после временной синхронизации. Оценивание и компенсация искажений радиоканала – это заключительный этап, он дополнительно устраняет (уменьшает) ошибки, допущенные алгоритмом синхронизации. Из анализа опубликованных работ следует, что для частотной синхронизации может быть использована информация, содержащаяся как в циклическом префиксе CP, так и в ячейках пилотных поднесущих частот полезной части OFDM-символов, параметры которых (амплитуда, частота, фаза) и расположение на частотно-временной сетке OFDM-сигнала заданы стандартом [3].

В [4] были приведены результаты исследования влияния частотных искажений на принимаемый сигнал, показывающие, что в зависимости от модуляционно-кодовой схемы, максимально допустимое отклонение частоты без компенсатора может достигать от 36 до 46 Гц. В текущей работе представлен метод на основе информации, полученной из циклического префикса, позволяющий компенсировать частотный сдвиг в рамках диапазона однозначного захвата, который зависит от длительности полезной части символа: $|\Delta F|FFT_{max}$. Для сигнала DRM с режимом помехозащищенности E этот диапазон составляет ± 222 Гц, что позволяет расширить допустимый диапазон частотного сдвига для принимаемого сигнала.

Основная часть

Структурная схема блока частотной синхронизации отображена на рис. 1.

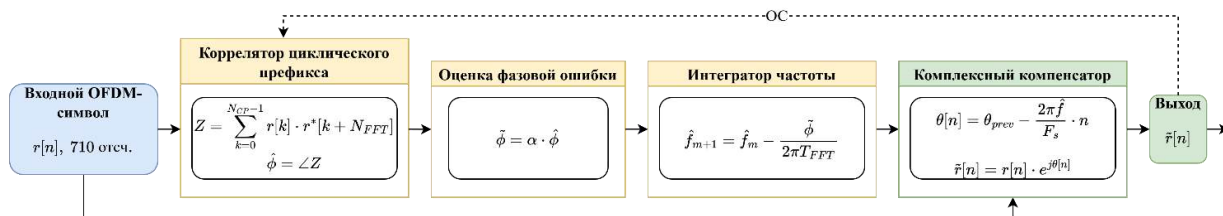


Рис. 1. Структурная схема блока частотной синхронизации

Входной OFDM-символ, длиной 710 отсчетов (71 отсчет – циклический префикс, N_{CP} ; 639 отсчетов – полезная часть OFDM-символа, N_{FFT}), подается на блок коррелятора. Здесь отсчеты циклического префикса (первые 71 отсчетов OFDM-символа, $r[k]$) перемножаются с последними комплексно-сопряженными 71 отсчетами полезной части OFDM-символа ($r^*[k + N_{FFT}]$) согласно формуле:

$$Z = \sum_{k=0}^{N_{CP}-1} r[k] \cdot r^*[k + N_{FFT}] \quad (1)$$

После перемножения и суммирования оценивается фазовый угол полученного сигнала:

$$\hat{\phi} = \arg(Z) \quad (2)$$

Его величина пропорциональна частотному сдвигу несущей частоты радиоканала при приеме.

Блок оценки фазовой ошибки (рис. 1). Величина $\hat{\phi}_m$ представляет собой фазовую ошибку при приеме OFDM-символа и описывается выражением:

$$\hat{\phi}_m = -2\pi \Delta f T_{FFT} + \varepsilon_m, \quad (3)$$

где $T_{FFT} = N_{FFT}/F_s$ – длительность полезной части символа, F_s – частота дискретизации, ε_m – аддитивная помеха оценки, обусловленная шумом радиоканала. Для снижения мгновенных флуктуаций полученных значений применен весовой коэффициент $\alpha \in (0, 1)$ и на вход следующего блока имитационной модели передается взвешенная оценка:

$$\tilde{\phi}_m = \alpha \hat{\phi}_m \quad (4)$$

Значение α определяет скорость реакции петли и величину подавления шума, при этом уменьшение α повышает устойчивость к помехам, но увеличивает время оценки частотного сдвига.

Блок интегратора частоты (рис. 1). Для обеспечения нулевой статической ошибки при оценке частотного сдвига используется интегратор первого порядка, накапливающий оценку частотного сдвига от символа к символу:

$$\hat{f}_{m+1} = \hat{f}_m - \frac{\tilde{\Phi}_m}{2\pi T_{FFT}} \quad (5)$$

Блок компенсатора (рис. 1). На каждом m -м символе формируется компенсирующий фазор, непрерывно нарастающий внутри кадра:

$$\theta_m[n] = \theta_{m-1}[N_{sym} - 1] - \frac{2\pi \hat{f}_m}{F_s} \cdot n, n = 0, 1, \dots, N_{sym} - 1, \quad (6)$$

где $\theta_{m-1}[N_{sym} - 1]$ – накопленная фаза на конце предыдущего кадра, хранящаяся в регистре состояния для обеспечения непрерывной работы между кадрами. Компенсированный сигнал вычисляется по формуле:

$$\tilde{r}_m[n] = r_m[n] \cdot e^{j \theta_m[n]} \quad (7)$$

Полученный сигнал $\tilde{r}_m[n]$ подается далее на выход блока и одновременно замыкает петлю обратной связи, возвращаясь на вход коррелятора циклического префикса следующего символа. Таким образом система функционирует как замкнутая петля фазовой/частотной автоподстройки первого типа, обеспечивающая отслеживание и компенсацию постоянного частотного рассогласования между передатчиком и приемником.

Результаты моделирования. В ходе моделирования был проведен ряд тестов для сигнала DRM при модуляции поднесущих частот QAM-4 и QAM-16 при работе в режимах устойчивости PL1 и PL2 соответственно. График скорости компенсации частотного сдвига показан на рис. 2. Ниже (рис. 3-6) приведены зависимости вероятности появления битовой ошибки от отношения сигнал-шум (SNR, дБ) при разных значениях частотного сдвига.

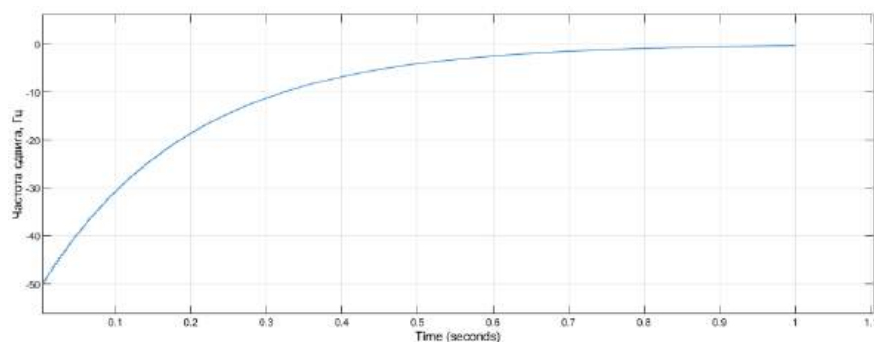


Рис. 2. График скорости компенсации частотного сдвига

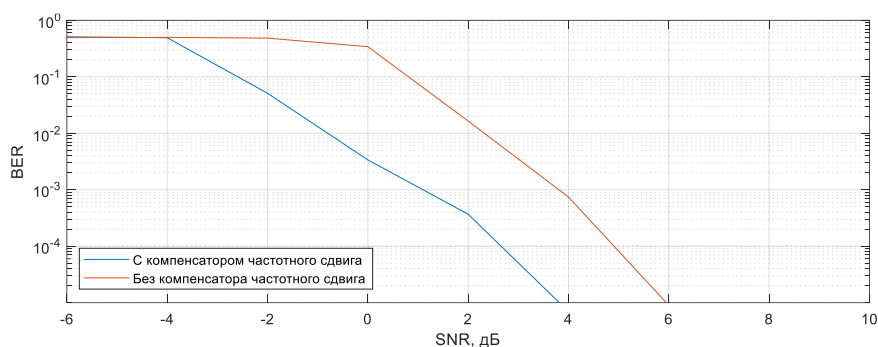


Рис. 3. Вероятность появления битовой ошибки от отношения сигнал-шум для модуляции QAM-4 при частотном сдвиге 42 Гц; режим устойчивости PL1

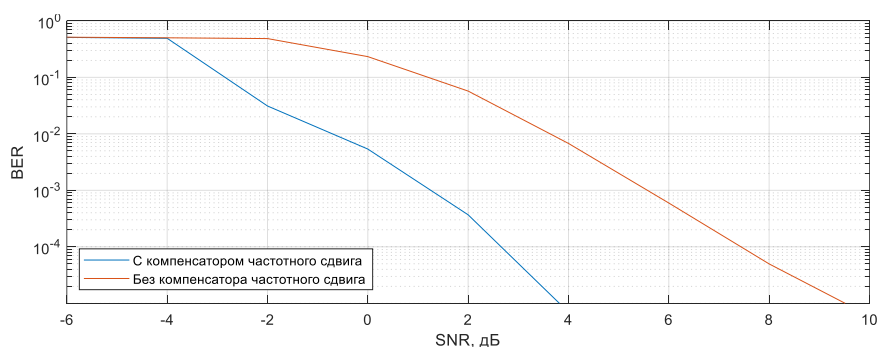


Рис. 4. Вероятность появления битовой ошибки от отношения сигнал-шум для модуляции QAM-4 при частотном сдвиге 44 Гц; режим устойчивости PL1

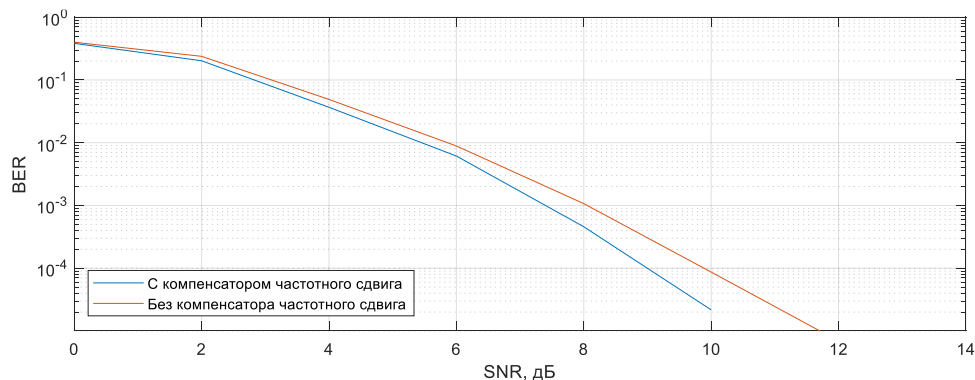


Рис. 5. Вероятность появления битовой ошибки от отношения сигнал-шум для модуляции QAM-16 при частотном сдвиге 15 Гц; режим устойчивости PL2

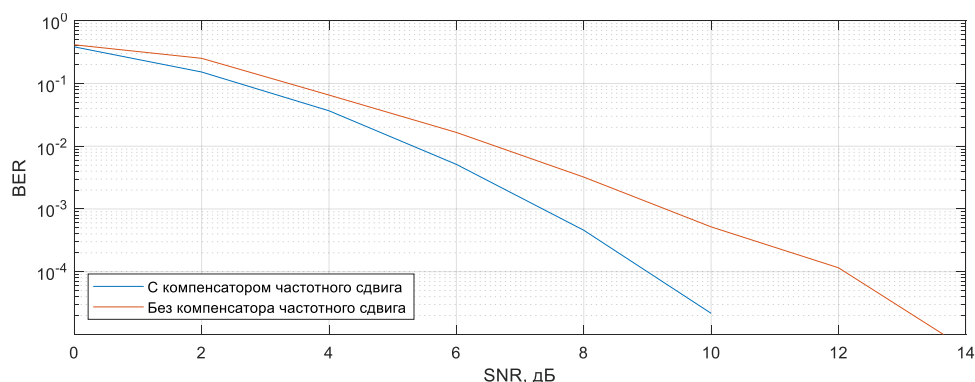


Рис. 6. Вероятность появления битовой ошибки от отношения сигнал-шум для модуляции QAM-16 при частотном сдвиге 25 Гц; режим устойчивости PL2

Заключение. Разработанный блок частотной синхронизации позволяет уменьшить влияние частотного сдвига на принимаемый сигнал, обеспечивая компенсацию сдвига при разных значениях CFO и разных модуляционно-кодовых схем, таким образом позволяя приемнику работать при значениях CFO вплоть до 222 Гц.

Список используемых источников

1. Технология OFDM: Учебное пособие для вузов / Бакулин М. Г., Крейнделлин В. В., Шлома А. М. и др. Горячая линия – Телеком, 216. 352 с.
2. Ковалгин Ю. А. Интерференция между поднесущими частотами в системе DRM// Труды учебных заведений связи. 2024. Т. 10. № 3. С. 35-44.
3. ETSI ES 201 980 V4.1.2 (2017-04) Digital Radio Mondiale (DRM); System Specification.; 2017. 195 p.
4. Ковалгин Ю. А. Влияние компенсации временного и частотного сдвигов OFDM-сигнала в системе цифрового радиовещания DRM / Ю. А. Ковалгин, О. А. Гуминский, Р. В. Киричек // Электросвязь. 2025. № 9. С. 103-114.

SIMULATION MODEL OF THE FREQUENCY SYNCHRONISATION BLOCK IN THE DRM SYSTEM

Guminskiy O., Kowalgin Y.

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

The results of the development and implementation of a frequency synchronization method, comprising blocks for estimating and compensating for the frequency offset of an OFDM signal, and evaluates its performance within a simulation model of the DRM systems transmit-receive chain.

Key words: OFDM synchronization, digital broadcasting, DRM

УДК 651.078

ГРНТИ 49.01.82

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ АНТЕНН ДЛЯ ПОИСКА ПОДЗЕМНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЙ СВЯЗИ

В. В. Давыдов, М. А. Толмачев

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В статье представлен сравнительный анализ эффективности различных конструкций антенн для поиска подземных оптических линий связи. Выполнено экспериментальное сравнение рамочных и ферритовых антенн с использованием различных типов ферритовых материалов РС40, N87, Т38. В ходе исследования были измерены ключевые параметры антенн, включая амплитуду сигнала, напряжение питания и ток потребления. Практическая значимость работы заключается в определении наиболее эффективных конструкций антенн для систем поиска подземных коммуникаций. Разработанные решения позволяют повысить точность обнаружения маркеров и оптимизировать энергопотребление поискового оборудования для повышения точности и скорости идентификации объектов под землей.

трассопоисковые устройства, интеллектуальный маркер, маркер, маркероискатель, подземные коммуникации, оптические кабели, феррит

Интенсивное развитие городской застройки сопровождается с активным ростом числа подземных коммуникации различных типов, что приводит к увеличению числа подземных телекоммуникационных систем связи, в частности волоконно-оптических линий связи [1-2]. В связи с этим плотность кабельной сети в городской застройке существенно выросла, часто коммуникации расположены на небольшой глубине друг друга, пересекаются или размещены вплотную.

Для точного определения нужной трассы линии связи, необходимо специализированное оборудование. Кабельные линии с металлическими составляющими, такие, как телефонные линии или силовые кабели, локализуют с использованием металлодетекторов. ВОЛС зачастую полностью лишены металлических элементов, что делает стандартные методы трассировки неэффективными. В отдельных случаях в их составе встречаются металлические детали, но они выполнены из немагнитных материалов и не обнаруживаемые металлодетекторами [3].

На сегодняшний день наиболее эффективным методом обнаружения различных подземных коммуникаций является применение специализированных маркеров. Их конструкция состоит из пассивного резонансного контура, размещенного в прочном пластиковом корпусе (рис. 1). Принцип работы системы электронной маркировки основан на сканировании поверхности земли специальным прибором – маркероискателем. Прибор генерирует сигнал, который вызывает в маркере колебания определенной частоты, с помощью которых он идентифицируется с поверхности [4].



Рис 1. Электронные маркеры для различных подземных коммуникаций

При поиске подземных коммуникаций, оборудованных LC-маркерами, тип антенны критически важен, он влияет не только на технические параметры устройства, но и на саму возможность решить практическую задачу [5]. Сама система использует связь в магнитном поле для передачи энергии и данных, что существенно ограничивает используемые технологии. Традиционные рамочные антенны, несмотря на простоту принципа работы, имеют существенные ограничения в реальных условиях. Ферритовые антенны, используют иной механизм взаимодействия с электромагнитным полем, расширяющий возможности поиска подземных объектов.

В исследования были выбраны различные типы ферритовых материалов, а именно: РС40, N87, Т38, что позволит определить влияние начальной магнитной проницаемости материала и максимальной рабочей частоты на эффективность передачи сигнала. Для объективности исследования спроектированные антенны имеют незначительное расхождение в размерах, связанные с размерами ферритовых колец. Характеристики исследуемых антенн представлены в таблице 1.

ТАБЛИЦА 1. Принимаемый сигнал на катушках

Тип антенны	Материал сердечника	Размеры антенны	Индуктивность, 1 кГц	Добротность, 100 кГц
Рамочная		215x175x15	6.3 мГн	42.32
Феррит	РС40, шаг 5мм	318x22	220.9 мкГн	169.8
Феррит	РС40, шаг 10мм	318x22	61.3 мкГн	121.2
Феррит	Т38, шаг 3.5мм	323x22	408.1 мкГн	103.3
Феррит	Т38, шаг 7мм	323x22	98.4 мкГн	102.5
Феррит	N87, шаг 3.5мм	323x22	359.3 мкГн	176.4
Феррит	N87, шаг 7мм	323x22	87 мкГн	78.2

Данный эксперимент моделирует максимально приближенный к реальному сценарию поиска маркеров, что дает объективную оценку эффективности работы системы. Уровень сигнала в исследовании записывался с приемной катушки диаметром 90 мм, расположенной на расстоянии 1,5 м от передающей антенны.

Используемый в данной работе передатчик подвергся полной переработке [6]. Новая схема позволяет эффективно передавать и принимать сигнал без усложнения схемотехники устройства, реализованный по мостовой схеме. Схема передатчика и приемника представлена на рисунке 2.

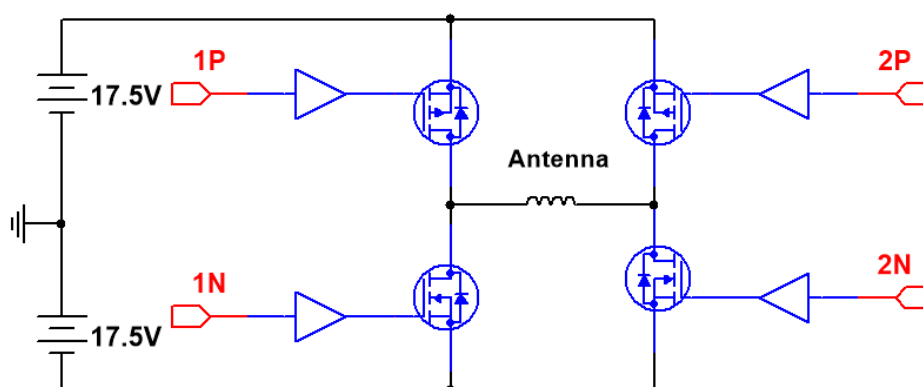


Рис 2. Схема передатчика и приемника

В ходе исследования напряжение на приемной катушке маркера фиксировалось как эффективность антенны, а ток и напряжение на передатчике как производительность системы. Полученные в ходе эксперимента данные были занесены в таблицу 2.

ТАБЛИЦА 2. Принимаемый сигнал на катушках

Тип антенны	Амплитуда сигнала, В	Напряжение питания, В	Ток потребления, А
Рамочная	0.1	35	0.002
РС40, шаг 5мм	0.22	35	0.035
РС40, шаг 10мм	0.38	35	0.12
Т38, шаг 3.5мм	0.12	35	0.035
Т38, шаг 7мм	0.27	35	0.071
Н87, шаг 3.5мм	0.105	35	0.041
Н87, шаг 7мм	0.22	35	0.08

Результаты показывают заметные различия между антеннами. Антенна Т38 с шагом 7 мм показала средний уровень сигнала на приемной катушке с амплитудой 0.27 В и мощностью передатчика приблизительно 2.49 Вт. Такое сочетание параметров свидетельствует о сбалансированной работе: Антенна обеспечивает достаточную передачу при умеренном энергопотреблении.

Антенна Т38 с шагом 3.5 мм показала самый низкий сигнал, с амплитудой всего 0.12В и мощностью передатчика 1.26 Вт, что является довольно низким показателем.

Антенны с материалом сердечника N87 демонстрируют крайне низкие показатели среди всех ферритовых антенн. Данная проблема связана с низкой магнитной проницаемостью ферритового материала. Однако данные антенны использовались для анализа максимальной рабочей частоты передачи, так как остальные типы антенн работают на пределе верхней рабочей частоты. Существенного различия между добротностью антенн Т38 и N87, что позволяет сделать вывод, о влиянии рабочей частота материала на эффективность передачи сигнала.

Самый минимальный уровень отклика продемонстрировала рамочная антенна, уровень сигнала составил 0.1В. При этом потребляемая мощность составила лишь 0.07 Вт, демонстрируя максимальную эффективность передачи сигнала. Данный тип антенн может быть использован для различных вариантов работ, где не требуется максимальная дальность работы или ограничения по энергопотреблению.

Самые лучшие показатели среди всех ферритовых антенн зафиксированы у материала РС40. Антенна с шагом намотки 5 мм, продемонстриро-

вала уровень сигнала в 0.22 В с потреблением 1.23 Вт и лучше подходит для задач, где важнее долгая работа без питания, чем максимальная мощность сигнала.

Антенна с шагом намотки 10 мм, продемонстрировала уровень сигнала в 0.38 В с потреблением 4.2 Вт. Данный вариант оптимален для задач с максимальной глубиной обнаружения и нет жестких ограничений по энергопотреблению.

Вывод

Доработка схемы передатчика привела к существенному изменению режима работы устройства. Обновленный вариант передатчика позволил эффективно использовать ферритовые антенны, а особенно важно, устранить сложности с подключением цепи приема и обработки сигнала от маркера.

Ферритовые антенны продемонстрировали более высокую эффективность по сравнению с рамочной. Их важным преимуществом является отсутствие жестко установленной рабочей частоты для феррита, что позволяет эффективно передавать сигнал к маркеру на разных частотах без изменения схемы.

На основе полученных данных, была выбрана антенна РС40 с шагом намотки 5 мм, ключевым аргументом в ее пользу является высокая эффективность и умеренное энергопотребление.

В дальнейшем планируется провести исследование с применением ферритовых колец диаметром 25, 31 и 36 мм для оценки влияния диаметра антенны на эффективность передачи сигнала.

Список используемых источников

1. Боев, М. Вопросы конструирования оптических кабелей для применения в терабитных системах передачи / М. Боев, Э. Ким, А. Микилев // Первая миля. 2022. № 8(108). С. 52-57. DOI: 10.22184/2070-8963.2022.108.8.52.56.
2. Карпов А. Г. Перспективы применения нового типа одномодовых волокон в сетях пятого поколения / А. Г. Карпов // Материалы XXX Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов».
3. Анализ методов поиска трассы и локализации мест повреждений полностью диэлектрического оптического кабеля / В. Гуреев, Б. Попов, В. Попов, К. Яблочкин // Первая миля. 2021. № 8(100). С. 26-31. DOI: 10.22184/2070-8963.2021.100.8.26.31.
4. Толмачев М. А. Исследование способов фиксации и обнаружения кабельных линий связи и иных подземных коммуникаций / М. А. Толмачев // Современные научные знания: сборник статей II Международной научно-практической конференции, Пенза, 30 июня 2023 года. Пенза: Наука и Просвещение (ИП Гуляев Г. Ю.), 2023. С. 54-56.

5. Wallace, J. W. Switched-Antenna Low-Frequency (LF) Radio-Frequency Identification (RFID) for Ornithology / J. W. Wallace, L. C. Diamantides, K. C. Ki, M. W. Butler // IEEE Journal of Radio Frequency Identification. 2020. Vol. 4. № 2. PP. 137–145.

6. Давыдов В. В. Особенности модернизации конструкции маркероискателя для фиксации и обнаружения подземных трасс оптических кабелей / В. В. Давыдов, М. А. Толмачев // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании» (АПИНО 2025): Сборник научных статей XIV Международной научно-технической и научно-методической конференции. В 2-х томах, Санкт-Петербург, 25–27 июня 2025 года. СПб.: СПбГУТ, 2025. С. 313-317.

COMPARISON ANALYSIS OF THE EFFECTIVENESS OF ANTENNA DESIGNS FOR SEARCHING UNDERGROUND OPTICAL COMMUNICATION LINES

Davydov V., Tolmachev M.

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

The article presents a comparative analysis of the effectiveness of various antenna designs for searching underground optical communication lines. An experimental comparison of frame and ferrite antennas using various types of ferrite materials PC40, N87, T38 has been performed. During the study, key antenna parameters were measured, including signal amplitude, supply voltage, and consumption current. The practical significance of the work lies in determining the most effective antenna designs for underground utility search systems. The developed solutions make it possible to increase the accuracy of marker detection and optimize the energy consumption of search equipment to increase the accuracy and speed of identifying objects underground.

Key words: tracking devices, intelligent marker, marker, marker finder, underground utilities, optical cables, ferrite

УДК 621.396.4

ГРНТИ 50.37.03

АЛГОРИТМЫ СЕМПЛИРОВАНИЯ КАК ПОТЕНЦИАЛЬНЫЙ ИНСТРУМЕНТ ПОВЫШЕНИЯ ОПЕРАТИВНОСТИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА БОЛЬШИХ ОБЪЕМОВ ДАННЫХ НА ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫХ РЕСУРСАХ ДАТА-ЦЕНТРОВ

Я. А. Домбровский, И. Б. Паращук, Д. Э. Сабиров

Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного

Рассмотрены некоторые важные аспекты и перспективы использования алгоритмов семплирования в качестве потенциального инструмента повышения оперативности интеллектуального анализа больших объемов данных на инфокоммуникационных ресурсах современных дата-центров. Алгоритмы семплирования предоставляют пользователю (аналитику данных) широкий диапазон возможностей по ускорению обработки «Больших Данных», по снижению нагрузки, экономии ресурсов и по корректровке несбалансированных данных. Проанализированы научные и практические аспекты построения современных механизмов повышения оперативности интеллектуальной обработки больших объемов данных на основе статистического семплинга, сущность, содержание и достоинства алгоритмов семплирования.

интеллектуальный анализ данных, семплирование, алгоритм, оперативность, дата-центр, инфокоммуникационные ресурсы

Проблема оперативной и достоверной обработки больших объемов данных, хранящихся, обрабатываемых и анализируемых на ресурсах современных крупных и распределенных дата-центров (ДЦ), не только продолжает оставаться актуальной, но и все более тревожит и «будоражит умы» своей неразрешенностью IT-инженеров и администраторов центров обработки данных ведущих провайдеров услуг, серьезных промышленных корпораций и большинства ведомств государственных отраслей промышленности, экономики и оборонной сферы нашей страны [1, 2].

В условиях набирающей обороты «цифровой трансформации», особые требования предъявляются к качеству и эффективности реализации процедур и технологий интеллектуальной аналитической обработки данных (ИАОД) в современных крупных информационно-технических и информационно-справочных системах, а также на инфокоммуникационных ресурсах

(ИКР) существующих и перспективных масштабных (распределенных) и «вместительных» дата-центров [3, 4].

В этой связи, особого внимания, по мнению современных исследователей и аналитиков, заслуживает не просто обработка данных, а анализ именно Big Data – «Больших Данных», аналитическая обработка по-настоящему крупных массивов гетерогенных данных с использованием, например, технологий искусственного интеллекта [4-8].

Зачастую, даже в среде серьезных исследователей, возникают разногласия – какие объемы данных считаются сейчас по-настоящему крупными массивами. Необходимо признать, что «Большие Данные» – это не только и не столько определенный объем, а, чаще, совокупность свойств (характеристик) массива – объем, скорость поступления и обработки, а также разнообразие форматов представления структурированных и неструктурированных данных. Даже с учетом этого факта, подтверждающего, что объем массива данных, собираемых, хранимых и обрабатываемых на ИКР ДЦ – не единственный критерий, затрудняющий или вовсе делающий невозможной их эффективную обработку традиционными методами и «инструментами», принято считать, что строго определенного диапазона (границ) по объему данных, которые можно отнести к «большим», не существует. Обычно объем данных, превышающий 100 Гбайт и, примерно, до нескольких Петабайт (Пбайт), считают «большим».

При этом под ИКР ДЦ понимается взаимоувязанная по целям, месту и времени организационно-техническая совокупность программного, аппаратного обеспечения и телекоммуникационной инфраструктуры центра обработки данных, обеспечивающая эффективные сбор, хранение, обработку, передачу и защиту данных, причем последней упомянутой процедуре – обеспечению безопасности информации на подобных распределенных платформах, уделяется особое значение [9].

В рамках современных ДЦ инфокоммуникационные ресурсы базируются на программно-аппаратных платформах серверов и отдельных систем хранения данных (СХД), обеспечиваются коммутаторами, системами бесперебойного питания, охлаждения, а также скоростными каналами коммуникаций, предоставляющими доступ в Интернет и услуги облачных сервисов для решения различных задач.

Отдельной важной задачей является задача ИАОД на ИКР ДЦ, которая представляет собой «очистку» данных и их детальный анализ с целью выявления скрытых, неявных, неочевидных закономерностей и извлечения су-

щественной, значимой, полезной информации, пригодной для практического использования.

Как и всякий процесс, ИАОД на ИКР ДЦ обладает рядом свойств, количественная интерпретация, численная характеристика которых возможна с помощью, так называемых, показателей качества (ПК) этого процесса. Множество показателей, численно характеризующих качество процесса ИАОД на ИКР ДЦ, описывающих, так называемое, AQ (Analysis Quality), позволяют количественно оценить «правильность» методов работы с данными и «ценность», практическую полезность полученных, по результатам анализа, выводов. Причем, с учетом особенностей анализа именно «Больших Данных», важное, часто главенствующее место, занимает количественное определение (вычисление) такого свойства ИАОД на ИКР ДЦ, как оперативность.

Оперативность ИАОД на ИКР ДЦ может быть представлена и охарактеризована в виде показателей (параметров), численно описывающих, например: среднее время анализа определенного объема данных за конкретный временной интервал; средняя скорость ИАОД – скорость получения результатов анализа определенного объема данных за определенное время; средняя скорость сбора данных, количественно описывающая минимальную по времени задержку между появлением данных (их фиксации и верификации) и их попаданием в аналитическую систему для интеллектуального анализа, а также среднее время доступности результатов анализа (Data Availability) – время, за которое «сырые», необработанные данные преобразуются в структурированные отчеты, пригодные для работы аналитиков.

Ключевой аспект этих показателей (параметров), численно характеризующих важнейшее свойство процесса ИАОД на ИКР ДЦ – оперативность, это время. Снижение времени на отдельные этапы и процедуры ИАОД и на интеллектуальную аналитическую обработку данных в целом, представляет собой цель исследований, определяет границы поиска доступных и эффективных инструментов, которые могут помочь обеспечить гарантированную своевременность анализа информации такого класса.

Возможным рациональным подходом к решению подобных задач, потенциальным методологическим и практическим инструментом для повышения оперативности ИАОД на ИКР ДЦ, по мнению авторов, могут служить алгоритмы семплирования (семплинга, или, иногда в литературе встречается, сэмплинга) данных [10-13].

Это, по сути, отдельный самостоятельный раздел математической статистики, описывающие методы выборки. Алгоритмы статистического семплирования применяются в математике, маркетинге, менеджменте, экономике, даже в музыке. Иными словами, это набор специальных методов и алгоритмов, позволяющих осуществить выбор некоторого подмножества данных (выборку) из большого массива, предназначенного для интеллектуального анализа. Это коллекция методов и алгоритмов, позволяющих быстро получить представление о характеристиках всего большого массива данных по его небольшой части.

Основная цель применения алгоритмов семплирования в качестве вспомогательного инструмента при ИАОД на ИКР ДЦ, ориентирована на повышение оперативности интеллектуальной аналитической обработки большого массива данных (за счет анализа не всего массива, а лишь его небольшого участка), на оптимизацию скорости интеллектуальной обработки данных имея задачу своевременно (быстро) получить репрезентативные выводы: выявить закономерности в больших массивах данных и извлечь из них существенную, полезную информацию с минимальными погрешностями. При этом из всего большого массива данных, хранящихся на ИКР ДЦ, может осуществляться простой равновероятностный выбор, пропорциональная выборка из каждого субмассива данных, «подвыборка» (стирание избыточных данных), а также «выборка сверху» – добавление данных в малочисленные субмассивы (классы) данных.

Иными словами, использование алгоритмов семплирования не только позволит ускорить ИАОД на ИКР ДЦ (очевидно, что анализ «кусочка» данных происходит быстрее, чем всего массива), но и будет способствовать снижению вычислительной (статистико-аналитической) нагрузки, позволит экономить ресурсы подсистемы анализа при работе с большими объемами данных. Более того, алгоритмы семплирования способны работать с несбалансированными классами данных, осуществлять корректировку данных, необходимых, например, для обучения современных нейросетевых моделей [11, 12].

Особый интерес для задач повышения оперативности ИАОД на ИКР ДЦ, на взгляд авторов, вызывает подход, который принято называть кластерным семплированием (Cluster Sampling). Здесь весь большой массив данных, хранящийся и подлежащий интеллектуальной аналитической обработке на ИКР ДЦ (вся генеральная совокупность) делится на «кластеры» (например, массив данных городского департамента здравоохранения де-

лится не только по видам болезней, но и по районам города и по возрасту пациентов), и целиком анализируются лишь несколько случайно выбранных подобных «кластеров», что позволяет быстро получить представление о характеристиках всего массива данных.

Например, в рамках работы городского департамента здравоохранения необходимо оперативно проанализировать уровень заболеваемости острыми респираторными инфекциями у 20000 детей старше десяти лет. Следуя алгоритму кластерного семплирования, вместо анализа большого множества детей, проживающих в городе, можно случайным образом выделить 2000 детей и получить результат (но с определенной погрешностью): если в выборке 12 % заболевших, можно предположить, что и во всем городе их примерно 12 %.

Таким образом, рассмотрены некоторые особенности и возможные перспективы применения алгоритмов семплирования в качестве потенциального инструмента повышения оперативности интеллектуального анализа больших объемов данных на инфокоммуникационных ресурсах современных дата-центров. Проанализированы научные и практические аспекты построения современных механизмов повышения оперативности интеллектуальной обработки больших объемов данных на основе статистического семплинга, сущность, содержание и достоинства алгоритмов семплирования. Алгоритмы семплирования предоставляют пользователю (аналитику данных) широкий диапазон возможностей по ускорению обработки «Больших Данных», по снижению нагрузки (экономии ресурсов) и по корректровке несбалансированных данных. Предполагается, что применение алгоритмов семплирования в качестве инструмента повышения оперативности интеллектуального анализа больших объемов данных позволит повысить не только своевременность, но и эффективность информационного обеспечения лиц, осуществляющих мониторинг данных и пользователей, принимающих решения на основе подобного анализа.

Список используемых источников

1. Толмачев М. Н., Чурилова Э. Р. Бизнес-аналитика: Статистическая обработка данных: учебное пособие. М.: КноРус, 2024. 283 с.
2. Вольфсон М. Б. Анализ данных: учебное пособие. СПб.: СПбГУТ. 2015. 82 с.
3. Цехановский В. В., Чертовской В. Д. Технология интеллектуального анализа данных в процессах и системах. СПб.: Лань. 2026. 168 с.
4. Михайличенко А. В., Паращук И. Б., Селезнев А. В. Интеллектуальная аналитическая обработка больших массивов гетерогенных данных в интересах контроля безотказности и ремонтпригодности мобильных дата-центров // Современные тенденции ин-

женерного образования. Сборник материалов научно-практической конференции. СПб.: ВАС, 2022. С. 188–192.

5. Баланов А. Н. Big Data и анализ статистики в спорте. М.: Лань. 2024. 272 с.
6. Тесленко И. Б., Крылов В. Е., Губернаторов А. М. и др. Анализ больших данных: учебное пособие. М.: КноРус, 2023. 295 с.
7. Паращук И. Б. Большие Данные, проблемы и перспективы // Неделя науки. Материалы конференции. В 2-х кн. Кн.2. СПб.: ВАС, 2015. С. 66-71.
8. Виткова Л. А., Паращук И. Б., Саенко И. Б. Проблематика и особенности процедур аналитической обработки больших массивов гетерогенных данных о событиях кибербезопасности в инфокоммуникационных сетях и системах // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании. XI Международная научно-техническая и научно-методическая конференция; сб. науч. ст. в 4 т. / Под. ред. А.В. Шестакова. СПб.: СПбГУТ, 2022. Т. 1. С. 279-283.
9. Авраменко В. С., Батенков К. А., Козленко А. В. Подход к количественной оценке вредоносных воздействий нарушителя безопасности информации в распределенных вычислительных системах // Информационные системы и технологии. 2025. № 4 (150). С. 120-127.
10. Miesch A. T. Methods of sampling, laboratory analysis, and statistical reduction of data. Washington: Nobel Press. 2025. 447 p.
11. Pitard F. F. Theory of sampling and sampling practice. London: CRC Press, 2019. 726 с.
12. Янцен Д. Д. Обзор алгоритмов сэмплинга для приближенного выполнения запросов в системах баз данных. URL: https://itworkshop.susu.ru/files/Yantsen_slides.pdf. (дата обращения: 12.02.2026).
13. Федько В. П., Бондаренко В. А. Мерчандайзинг и сэмплинг: Учебное пособие. Ростов-на-Дону: Издательский Центр «МарТ». 2006. 304 с.

SAMPLING ALGORITHMS AS A POTENTIAL TOOL FOR INCREASING THE EFFICIENCY OF INTELLIGENT ANALYSIS OF LARGE VOLUMES OF DATA ON THE INFORMATION AND COMMUNICATION RESOURCES OF DATA CENTERS

Dombrovsky J., Parashchuk I., Sabirov D.

Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union
S. M. Budyonny

This article examines several important aspects and prospects for using sampling algorithms as a potential tool for improving the efficiency of intelligent analysis of large volumes of data on the information and communication resources of modern data centers. Sampling algorithms offer users (data analysts) a wide range of opportunities to accelerate Big Data processing, reduce workloads, conserve resources, and correct imbalanced data. The article analyzes the scientific and practical aspects of developing modern mechanisms for improving the efficiency of intelligent processing of large volumes of data based on statistical sampling, as well as the nature, content, and advantages of sampling algorithms.

Key words: data mining, sampling, algorithm, efficiency, data center, information and communication resources

УДК 681.7.068
ГРНТИ 49.44.29АНАЛИЗ ПЕРЕДАТОЧНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АНАЛОГОВЫХ
ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ СВЯЗИ НА ОСНОВЕ
ЛАЗЕРА С ПРЯМОЙ МОДУЛЯЦИЕЙА. Н. Дорожкин¹, О. Ю. Князев^{1,2}, Д. А. Ларьков¹, Т. Д. Ненашев^{1,3},
И. И. Шихалиев¹¹Научно-технический центр Т8²Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана³Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

В работе описаны методы расчета и моделирования параметров радиофотонного тракта на основе лазера с прямой модуляцией. Представлены аналитические подходы к линейному и гармоническому приближению зависимости выходной оптической мощности от тока накачки лазерного диода, а также результаты численного моделирования. Проведена экспериментальная верификация и представлены результаты сравнения передаточных характеристик тракта: коэффициента усиления, коэффициента шума и динамического диапазона без паразитных составляющих.

радиофотонный тракт, лазер с прямой модуляцией, коэффициент передачи, коэффициент шума, динамический диапазон без паразитных составляющих

Линии связи на основе радиофотонного тракта (РФТ) с лазером прямой модуляции [1] являются ключевыми компонентами современных систем передачи аналоговых сигналов по оптическому волокну. Критически важными параметрами РФТ [2] являются коэффициент передачи (Gain), коэффициент шума (NF) и динамический диапазон без паразитных составляющих (SFDR) [3]. Исследуемая система показана на рис. 1 и представляет собой РФТ, который состоит из лазера с прямой модуляцией (DML), оптического волокна, и широкополосного фотодиода, который преобразует модуляцию оптической мощности в модуляцию напряжения.



Рис. 1. Схема радиофотонного тракта

Для исследования параметров РФТ используются аналитические методы, основанные на аппроксимации передаточной характеристики DML. В

данной работе рассматриваются три подхода: линейная аппроксимация зависимости выходной оптической мощности (P_{opt}) от тока накачки лазерного диода (I_{ld}), аппроксимация восходящим сегментом гармонической функции и численная модель, основанная на втором методе. В первом случае зависимость имеет вид:

$$P_{opt} = k \cdot I_{ld}, \quad (1)$$

где k – чувствительность по току.

В этом случае мы не можем проанализировать SFDR2, SFDR3, так как считаем лазер абсолютно линейным и данные параметры равны бесконечности.

Во втором случае используется модель гармонической аппроксимации:

$$P_{opt}(I_{ld}) = P_0 \times \sin(m \times (I_{ld} - I_{th})), \quad (2)$$

где P_0 – амплитуда оптической мощности, m – коэффициент аппроксимации, I_{th} – пороговый ток накачки лазера.

Аппроксимация передаточной характеристики лазера формулами 1 и 2 представлена на рисунке 2.

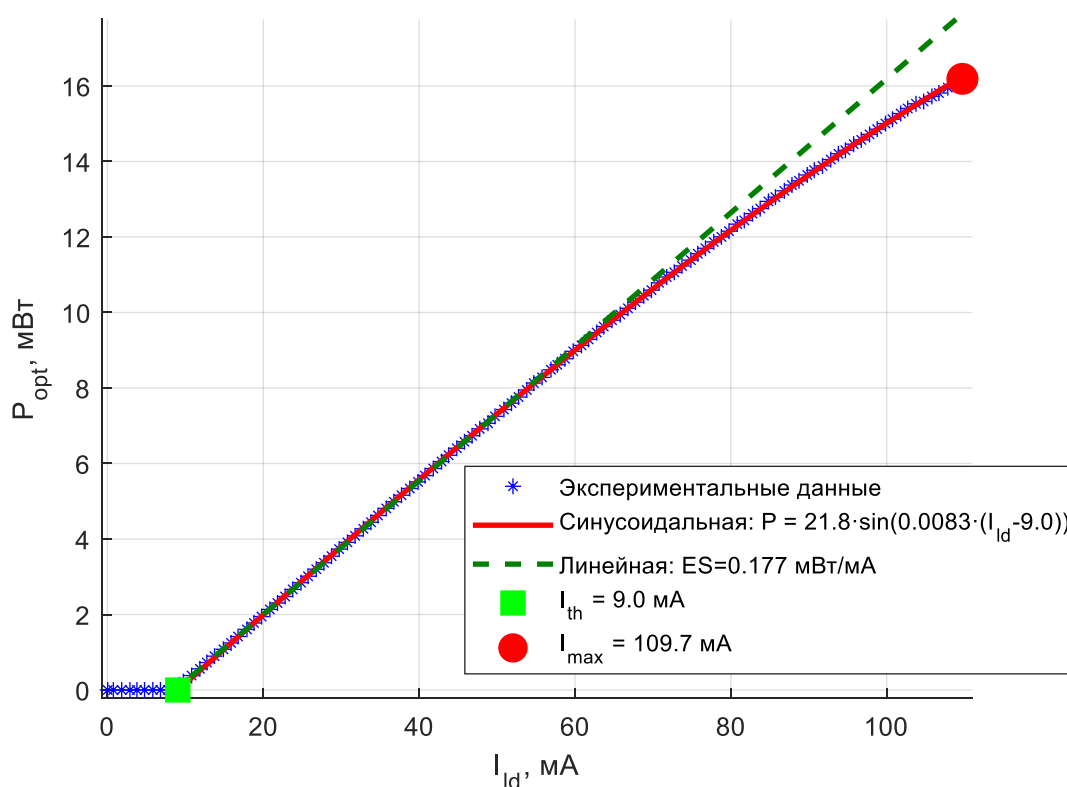


Рис. 2. Аппроксимация ВАХ лазера линейной и гармонической функцией

Модель гармонической функции позволяет учитывать нелинейность характеристики модуляции вблизи рабочей точки лазерного диода. Численная модель разработана на основе второго метода, что позволяет анализировать интермодуляционные искажения [1].

Для проверки аналитических расчетов и верификации численной модели проведен эксперимент, в ходе которого получены передаточные характеристики РФТ. Представлено сравнение передаточных характеристик Gain, NF, SFDR2, SFDR3, полученных четырьмя методами. Параметры SFDR2 и SFDR3 показывают степень влияния интермодуляционных искажений системы РФТ. При переходе в нелинейную часть ВАХ лазерного диода увеличиваются интермодуляционные искажения и соответственно уменьшаются значения параметров SFDR2 и SFDR3.

Для оценки результатов аппроксимации и численного моделирования был проведен эксперимент, в котором излучение DML подавалось на фотодиод, без использования оптического волокна. DML модулировался двухтонным сигналом с частотой 100 Гц и 150 Гц. Ниже в таблице представлены параметры системы РФТ при токе накачки, равном 60 мА. В эксперименте использовался фотоприемник с чувствительностью 0.9 мВт/мА и полосой 40 ГГц.

Параметры Gain и NF измерялись классическим разностным методом при включении и выключении генератора шума [4]. Параметры SFDR2 и SFDR3 вычислялись после обработки спектров сигнала на выходе системы (РФТ), полученных с помощью радиочастотного спектроанализатора.

В таблице 1 представлены результаты трех аналитических методов и экспериментального исследования.

ТАБЛИЦА 1. Сравнение результатов

	Линейная аппроксимация	Аппроксимация sin	Численная модель	Эксперимент (0-2.5 ГГц)
Gain, дБ	-24,0	-23,76	-23,11	-23,54
NF, дБ	37,4	37,1	36,25	35,42
SFDR2, дБ	-	88,5	88,88	91,9
SFDR3, дБ	-	115,3	115,35	115,75

Результаты аппроксимации гармонической функцией и численного моделирования хорошо согласуются с результатами эксперимента. Расхождения в результатах могут возникнуть из-за следующих допущений и факторов: не учитывались температурный дрейф DML, нелинейность передаточной характеристики фотодиода и его насыщение.

Таким образом, каждый из рассмотренных методов соответствует экспериментальным данным. Линейная аппроксимация является простейшим подходом, однако она не может быть использована для анализа SFDR. Гармоническая аппроксимация включает более сложные вычисления, но позволяет анализировать нелинейности. Численная модель обеспечивает наглядную визуализацию результатов, но требует больше вычислительных ресурсов и предварительной обработки данных.

Список используемых источников

1. Урик-мл. В. Дж. Основы микроволновой фотоники. / В. Дж. Урик-мл., Дж. Д. МакКинни, К. Дж. Вильямс. М.: Техносфера, 2016. С. 250–252.
2. Тамракар Б. Анализ, реализация и возможности исследований в области линий связи «радио по оптоволокну» в дисперсионной среде для сетей следующего поколения / Б. Тамракар, В. Гупта, А. Канунго, В. К. Верма, Ш. Шукла, Н. Агравал, М. К. Сингх, А. Синха // J. Opt. 2025 DOI: 10.1007/s12596-024-02439-z.
3. Фан Ш. Управление оптимальной линейной рабочей точкой кремниевого модулятора Маха – Цендера / Ш. Фан, Ц. Фань, Ц. Чжан, С. Цзян, Ч. Вэй, Ц. Ян, Х. Юй // Opt. Express. 2025. Т. 33, № 16. С. 33609–33621. URL: <https://opg.optica.org/oe/fulltext.cfm?uri=oe-33-16-33609> (дата обращения: 20.04.2026).
4. Бельчиков С. Коэффициент шума: теория и практика измерений // Компоненты и технологии. 2008. № 4. С. 196.

TRANSFER FUNCTION ANALYSIS OF ANALOG FIBER-OPTIC COMMUNICATION SYSTEMS BASED ON DIRECT LASER MODULATION

Dorozhkin A.¹, Knyazev O.^{1,2}, Larkov D.¹, Nenashev T.^{1,3}, Shihaliev I.¹

¹T8 Scientific and Technical Center

²Bauman Moscow State Technical University

³National Research Nuclear University MEPhI

The methods of calculation and modeling of parameters of a Radio-over-fiber link based on direct modulation of laser. Analytical approaches for linear and harmonic approximation of the output optical power to laser diode pump current dependence are presented, along with numerical modeling results. These methods are verified experimentally, and the comparison of the Radio-over-fiber link's transfer characteristics is shown: gain, noise figure, and spurious-free dynamic range.

Key words: RoF link, DML, gain, NF, SFDR

УДК 621.39, 530.182

ГРНТИ 49.44.31

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЛИНЕЙНЫХ И НЕЛИНЕЙНЫХ ЭФФЕКТОВ В ВОСС С УПРАВЛЕНИЕМ ДИСПЕРСИЕЙ

С. Э. Доценко

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В работе исследовано взаимодействие дисперсионных и нелинейных эффектов в волоконно-оптических системах связи с управлением дисперсией. На основе нелинейного уравнения Шредингера получена система обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающая изменение длительности импульса и параметра частотного чирпа для импульса секансной формы. Рассмотрено распространение импульсов в волоконно-оптическом линейном тракте с периодическим чередованием участков одномодовых оптических волокон с нормальной и аномальной дисперсией групповых скоростей. Выполнено численное моделирование одноканальной волоконно-оптической системы связи на базе оптических волокон G.655. Показано, что при определенном соотношении дисперсионных и нелинейных параметров реализуется устойчивый режим распространения импульсов, характеризующийся периодическими колебаниями длительности и частотного чирпа. Проведено сравнение результатов математической модели и моделирования в среде OptiSystem. Расхождение результатов в области устойчивого режима распространения не превышает 0.25 %.

волоконно-оптическая система связи, управление дисперсией, оптическое волокно G.655, фазовая самомодуляция, хроматическая дисперсия, имитационное моделирование, нелинейная оптика

Для анализа изменения оптических импульсов в волоконно-оптической системе связи (ВОСС) с управлением дисперсией рассмотрим распространение оптического поля в одномодовом оптическом волокне (ОМ ОВ) с периодически изменяющимся коэффициентом дисперсии групповых скоростей (ДГС). В приближении медленно меняющейся огибающей распространение оптического поля $A(z, t)$ в ОМ ОВ с учетом затухания описывается модифицированным нелинейным уравнением Шредингера (НУШ) [1-3]

$$i \frac{\partial A}{\partial z} - \frac{\beta_2(z)}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} + \gamma |A|^2 A = -\frac{i}{2} \alpha(z) A,$$

где z – продольная координата вдоль ОМ ОВ, t – время в сопровождающей системе отсчета, $\beta_2(z)$ – коэффициент ДГС, γ – коэффициент нелинейности ОМ ОВ, $\alpha(z)$ – коэффициент затухания ОМ ОВ.

В системах с управлением дисперсией коэффициент $\beta_2(z)$ периодически изменяется вдоль ВОЛТ в следствие чередования ОМ ОВ с нормальной ($\beta_2 > 0$) и аномальной ($\beta_2 < 0$) ДГС. Длина одной секции управления дисперсией определяется выражением [1, 4]

$$L_s = l_n + l_a.$$

где l_n – длина участка ОМ ОВ с нормальной дисперсией, l_a – длина участка ОМ ОВ с аномальной дисперсией.

Среднее значение ДГС и коэффициент нелинейности в пределах одной секции ОМ ОВ определяется как [1, 4]

$$\langle \beta_2 \rangle = \frac{\beta_{2n}l_n + \beta_{2a}l_a}{l_n + l_a}, \quad \langle \gamma \rangle = \frac{\gamma_n l_n + \gamma_a l_a}{l_n + l_a}.$$

Предполагается, что при распространении форма импульса сохраняется, а изменяются только его параметры. Для описания распространения импульса в форме гиперболического секанса используется функция [1]:

$$A(z, t) = A_0(z) \operatorname{sech} \left(\frac{t}{T(z)} \right) \exp \left[-\frac{i}{2} C(z) \frac{t^2}{T^2(z)} \right], \quad (1)$$

где $A_0(z)$ – амплитуда импульса, $T(z)$ – параметр длительности импульса, $C(z)$ – параметр частотного чирпа,

Импульс секансной формы $A(0, t) = \sqrt{P_{\text{in}}} \operatorname{sech}(t/T_0)$ соответствует решению НУШ для фундаментального солитона и более корректно описывает устойчивые нелинейные режимы распространения по сравнению с гауссовской аппроксимацией [1, 6]. Связь между параметром T_0 и шириной импульса по полувысоте интенсивности t_{ul} представлена формулой [1–6]: $t_{ul} = 2 \ln(1 + \sqrt{2}) T_0 \approx 1.763 T_0$. Следовательно, начальная длительность импульса определяется как $T_0 = t_{ul}/1.763$.

Пиковая мощность определяется выражением $P_0(z) = |A_0(z)|^2$. Интегральные характеристики импульса для описания распространения энергии E , среднеквадратичная длительности σ^2 и параметра чирпа C_p задаются выражениями [1]:

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} |A|^2 dt, \sigma^2 = \frac{1}{E} \int_{-\infty}^{\infty} t^2 |A|^2 dt, C_p = \frac{i}{2E} \int_{-\infty}^{\infty} t \left(A^* \frac{\partial A}{\partial t} - A \frac{\partial A^*}{\partial t} \right) dt. \quad (2)$$

Подставив выражения (1) в систему интегралов (2), получим:

$$E = 2A_0^2 T, \sigma^2 = \frac{\pi^2}{12} T^2, C_p = \frac{\pi^2}{6} C. \quad (3)$$

При отсутствии потерь энергия сохраняется $E = \text{const}$. Для импульса в форме гиперболического секанса уравнения изменения среднеквадратичной длительности и параметра чирпа принимают вид [1]:

$$\frac{d\sigma^2}{dz} = \frac{\beta_2}{E} \int_{-\infty}^{\infty} t^2 \text{Im} \left(A^* \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} \right) dt,$$

$$\frac{dC_p}{dz} = \frac{2\beta_2}{E} \int_{-\infty}^{\infty} \left| \frac{\partial A}{\partial t} \right|^2 dt + \frac{\gamma}{E} \int_{-\infty}^{\infty} |A|^4 dt.$$

Для вычисления нелинейного интеграла используется соотношение $\int_{-\infty}^{\infty} \text{sech}^4 x dx = \frac{4}{3}$, а для дисперсионного члена $\int_{-\infty}^{\infty} \left| \frac{\partial A}{\partial t} \right|^2 dt = \frac{2A_0^2}{3T} (1+C^2)$.

С учетом соотношений (3) и закона сохранения энергии $E = 2P_{\text{in}}T_0$ получаем систему обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) для импульса секансной формы:

$$\frac{dT}{dz} = \frac{2\beta_2 C}{T}, \quad (4)$$

$$\frac{dC}{dz} = \frac{\beta_2}{T^2} (1+C^2) + \frac{2}{3} \gamma P_{\text{in}} \frac{T_0}{T} \exp(-\alpha z) \quad (5)$$

где P_{in} – пиковая мощность на входе ВОЛТ, T_0 – начальная длительность импульса.

Система уравнений (4) и (5) полностью описывает распространение импульсов в форме гиперболического секанса вдоль ВОЛТ. Уравнения для гауссова и секансного импульсов имеют одинаковую структуру, но различаются значениями интегральных коэффициентов.

Нелинейность не оказывает непосредственного влияния на изменение длительности импульса, однако определяет эволюцию параметра частотного чирпа. При определенном соотношении параметров дисперсии и нелинейности реализуется баланс между дисперсионным уширением и нелинейной фазовой самомодуляцией (ФСМ).

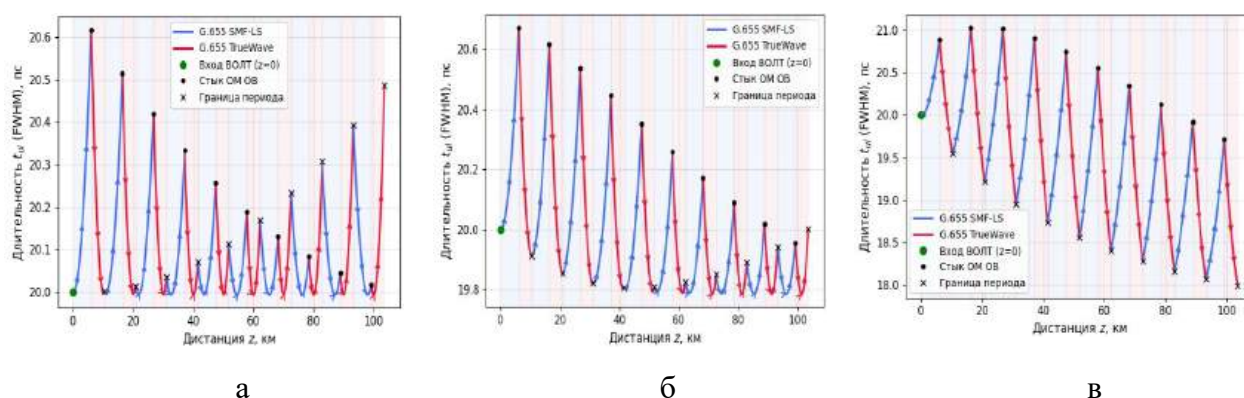
В исследуемой ВОЛТ использовалось чередование ОМ ОВ G.655 SMF-LS длиной $l_n = 6$ км и G.655 TrueWave длиной $l_a = 4.4$ км, обеспечивающее режим слабого управления дисперсией. В этом режиме достигается периодическое изменение параметров импульса без значительного накопления дисперсионных искажений [1]. Параметры используемых ОМ ОВ приведены в таблице 1 [7].

ТАБЛИЦА 1. Параметры ОМ ОВ, используемых в модели ВОЛТ

Тип ОМ ОВ	α , дБ/км	D , пс/(н м·км)	S , пс/(н м ² ·км)	A_{eff} , мкм ²	$n_2 \cdot 10^{-21}$, м ² /Вт	β_2 , пс ² /км	γ , (Вт·км) ⁻¹
G.655 (TrueWave)	0.22	4.5	0.045	52	26.0	-5.7	2.03
G.655 (SMF-LS)	0.20	-3	-0.05	48	26.0	3.80	2.20

На основе полученной системы ОДУ (4) и (5) была построена математическая модель на языке *Python*. Численное интегрирование системы ОДУ осуществлялось методом последовательного расчета параметров импульса на каждом участке ВОЛТ с учетом изменения коэффициентов ДГС, нелинейности и накопленных потерь.

На рис. 1 представлены зависимости длительности импульса в ВОЛТ длиной 103.4 км при разных значениях пиковой мощности.

Рис. 1. Изменение длительности импульса в ВОЛТ а) $P_{in}=0.1$; б) $P_{in}=2.07$; в) $P_{in}=10$ мВт

При малой мощности (рис. 1а) $P_{in} = 0.1$ мВт нелинейный вклад оказывается недостаточным для компенсации ХД, вследствие чего наблюдается постепенное расширение импульса.

При увеличении пиковой мощности (рис. 1б) до $P_{in} = 2.07$ мВт достигается баланс между ДГС и ФСМ. В этом режиме длительность импульса на выходе ВОЛТ практически совпадает с входной, а параметры импульса совершают периодические колебания внутри секции ОМ ОВ с разными знаками ДГС.

При дальнейшем увеличении мощности (рис. 1в) до $P_{in} = 10$ мВт вклад ФСМ начинает преобладать над дисперсионным, что приводит к заметному сужению импульса.

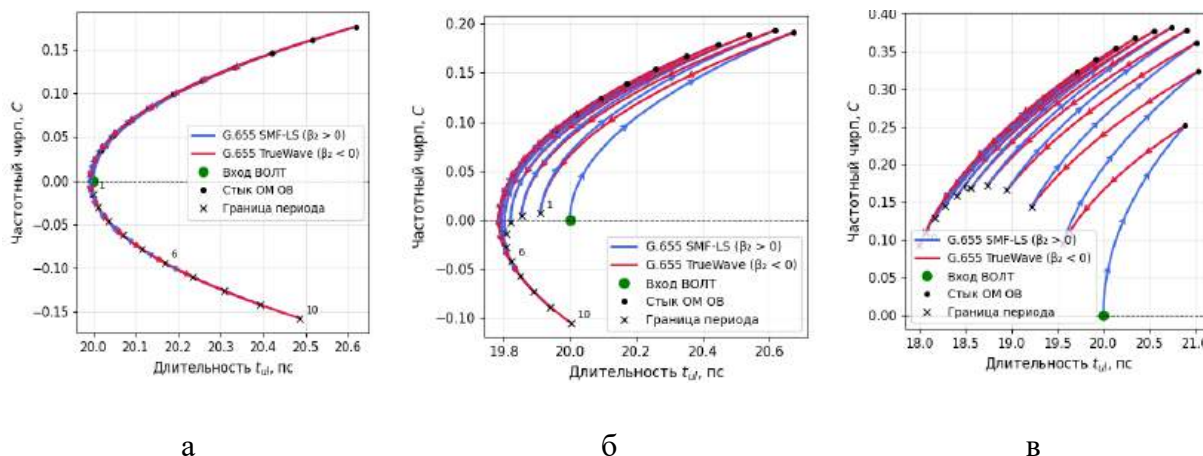


Рис. 2. Фазовый портрет на ВОЛТ а) $P_{in}=0.1$; б) $P_{in}=2.07$; в) $P_{in}=10$ мВт

Фазовые портреты, представленные на рис. 2, подтверждают существование устойчивого режима распространения. Вблизи пиковой мощности 2 мВт, фазовая траектория принимает замкнутый вид. При малых мощностях параметр чирпа изменяется практически линейно вследствие периодической смены знака коэффициента ДГС на различных участках ВОЛТ. С увеличением мощности возрастает влияние ФСМ, приводящее к формированию выраженного положительного частотного чирпа.

Для подтверждения корректности математической модели на основе ОДУ выполнено моделирование в среде *OptiSystem*. Результаты, представленные в таблице 2, хорошо согласуются между собой. В области устойчивого режима распространения при пиковой мощности $P_{in} = 2.07$ мВт, расхождение по длительности импульса не превышает 0.25 %.

В режимах, существенно отклоняющихся от устойчивого режима распространения, наблюдались систематические расхождения между математической моделью и результатами численного моделирования. Основной причиной является ограничение используемой математической модели, связанное с фиксированной формой импульса. В сильно нелинейном режиме часть энергии излучается в виде дисперсионных волн, вследствие чего изменяется форма импульса. Используемая модель не учитывает потери энергии на излучение дисперсионных компонент и поэтому приводит к завышению расчетной длительности импульса.

ТАБЛИЦА 2. Результаты моделирования ВОСС при управлении дисперсией

P_{in} , мВт	Длина ВОСС, км	Кол-во секций N	Мат. модель		OptiSystem		Δt , пс	ε , %
			P_{out} , мВт	t_{ul} , пс	P_{out} , мВт	t_{ul} , пс		
0.1	10.34	1	0.061	20.0	0.061	20.03	0.03	0.15
	20.68	2	0.036	20.0	0.036	20.10	0.10	0.50
	41.36	4	0.013	20.06	0.013	20.20	0.14	0.69
	62.04	6	0.005	20.16	0.005	20.22	0.06	0.30
	82.72	8	0.002	20.30	0.002	20.51	0.21	1.02
	103.4	10	0.0007	20.49	0.0007	20.77	0.28	1.35
2.07 (квази-солитон)	10.34	1	1.26	19.91	1.26	19.92	0.01	0.05
	20.68	2	0.77	19.85	0.77	19.82	0.03	0.15
	41.36	4	0.27	19.80	0.28	19.78	0.02	0.10
	62.04	6	0.10	19.82	0.10	19.82	0.00	0.00
	82.72	8	0.039	19.89	0.039	19.84	0.05	0.25
	103.4	10	0.014	20.00	0.014	20.00	0.00	0.00
10	10.34	1	6.10	19.53	6.20	19.33	0.20	1.03
	20.68	2	3.69	19.18	3.85	18.75	0.43	2.29
	41.36	4	1.37	18.72	1.46	18.03	0.69	3.83
	62.04	6	0.51	18.38	0.55	17.63	0.75	4.25
	82.72	8	0.19	18.14	0.20	17.49	0.65	3.72
	103.4	10	0.07	17.96	0.07	17.35	0.61	3.52

Полученные результаты подтверждают эффективность разработанной математической модели для анализа взаимодействия дисперсионных и нелинейных эффектов в ВОСС с управлением дисперсией.

Список используемых источников

1. Agrawal G. P. Nonlinear Fiber Optics. 5th ed. Oxford: Academic Press, 2013. 629 p.
2. Кившарь Ю. С., Агравал Г. П. Оптические солитоны. От волоконных световодов до фотонных кристаллов. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. 648 с.
3. Agrawal G. P. Fiber-Optic Communication Systems. 4th ed. Wiley, 2010. 626 p.
4. Былина М. С., Глаголев С. Ф., Доценко С. Э. Анализ методов управления дисперсией для поддержания квазисолитонного режима распространения импульсов в высокоскоростной волоконно-оптической системе связи // Труды учебных заведений связи. 2024. Т. 10. № 4. С. 16–26. DOI: 10.31854/1813-324X-2024-10-4-16-26. EDN: KIGLSY

5. Глаголев С. Ф., Доценко С. Э. Квазисолитонный режим в многопролетной волоконнооптической системе связи с применением оптических усилителей // Труды учебных заведений связи. 2023. Т. 9. № 2. С. 47–56. DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-2-47-56

6. Глаголев С. Ф., Доценко С. Э., Соколов Г. Ю., Юдина Е. А. Исследование влияния хроматической дисперсии в одномодовых оптических волокнах на импульсы различной формы // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2022): XI Международная научно-техническая и научно-методическая конференция: сборник научных статей. Санкт-Петербург, 2022. С. 349-353.

7. Листвин А. В., Листвин В. Н., Швырков Д. В. Оптические волокна для линий связи. М.: ЛЕСАР-арт, 2003. 288 с.

Статья представлена научным руководителем, доцентом кафедры ОКСС СПбГУТ, кандидатом технических наук С. Ф. Глаголевым

INVESTIGATION OF THE INTERACTION OF LINEAR AND NONLINEAR EFFECTS IN DISPERSION-MANAGED FIBER-OPTIC COMMUNICATION SYSTEMS

Dotsenko S.

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

The interaction of dispersive and nonlinear effects in dispersion-managed fiber-optic communication systems is investigated. A system of ordinary differential equations describing the evolution of pulse duration and chirp parameter for a hyperbolic secant pulse is derived from the nonlinear Schrödinger equation. Pulse propagation in an optical transmission line with periodic alternation of single-mode optical fibers exhibiting normal and anomalous group-velocity dispersion is considered. Numerical simulation of a single-channel fiber-optic communication system based on G.655 optical fibers is performed. It is shown that a stable propagation regime characterized by periodic oscillations of pulse duration and chirp parameter is achieved at a specific balance between dispersive and nonlinear effects. Comparison of the mathematical model and OptiSystem simulation results demonstrates good agreement. The discrepancy between the results in the stable propagation regime does not exceed 0.25 %.

Key words: fiber-optic communication system, dispersion management, G.655 optical fiber, self-phase modulation, chromatic dispersion, simulation, nonlinear optics

УДК 621.391

ГРНТИ 49.44.33

РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ ПОДСИСТЕМЫ ЦИФРОВОЙ ДИАГНОСТИКИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ПРИЕМОПЕРЕДАЮЩИХ МОДУЛЕЙ

А. С. Дюбов

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Рассматривается подсистема цифровой диагностики волоконно-оптических приемопередающих модулей. Показано, что диагностические параметры модуля связаны с физическими сигналами, формируемыми во внутренних оптоэлектронных узлах, измерительных цепях и цепях управления. Представлена структурная модель оптического трансивера с выделением передающей и приемной оптических сборок, контроллера, энергонезависимой памяти и блока цифровой диагностики. Рассмотрена организация диагностической памяти и показано формирование данных о передаваемой оптической мощности на основе сигнала мониторингового фотодиода в передающей оптической сборке. Отмечено, что достоверность цифровой диагностики определяется качеством реализации измерительного тракта, калибровкой и учетом рабочих условий. При надлежащей разработке подсистема цифровой диагностики может использоваться не только для формирования предупреждений и аварийных сигналов, но и как источник данных для анализа изменения состояния оптического трансивера и волоконно-оптического канала во времени.

волоконно-оптический приемопередающий модуль, цифровая диагностика, мониторинг оптической мощности, эксплуатационная аналитика, волоконно-оптическая линия связи, оптический интерфейс

Волоконно-оптические приемопередающие модули SFP/SFP+ и аналогичные им оптические трансиверы обычно рассматриваются как компактные средства оптоэлектронного преобразования сигнала. В направлении передачи электрический сигнал преобразуется в оптический, а в приемном направлении оптический сигнал вновь преобразуется в электрический. Однако в современных системах связи такой модуль выполняет не только формирование физического интерфейса. Трансивер также является источником эксплуатационной информации о собственном состоянии и о состоянии волоконно-оптического канала. Эта функция реализуется встроенной подсистемой цифровой диагностики DDM (Digital Diagnostic Monitoring). Модуль предоставляет внешнему оборудованию набор параметров текущего состо-

яния: температуру внутренней области модуля, напряжение питания, ток смещения лазерного диода, передаваемую оптическую мощность и уровень принимаемого оптического сигнала [1-3].

Этот функционал позволяет рассматривать оптический трансивер не только как элемент тракта передачи, но и как малогабаритную оптоэлектронную измерительную систему со встроенными средствами самоконтроля.

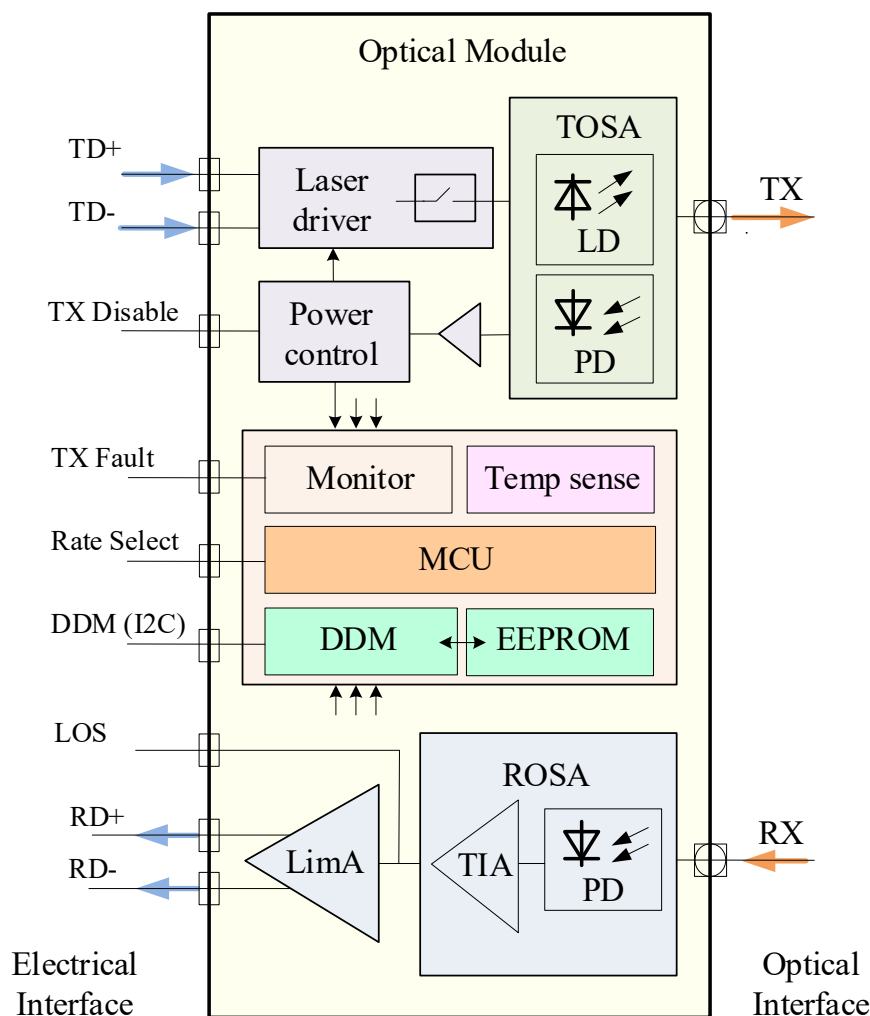


Рис. 1. Структурная схема приемопередающего модуля

С точки зрения разработчика оптический трансивер целесообразно представить как совокупность функциональных узлов, связанных внутренними цепями контроля и управления, рис.1. Для дальнейшего анализа в работе используется структурная модель волоконно-оптического приемопередающего модуля, в которой выделены электрический интерфейс внешнего оборудования (**Electrical Interface**), передающая оптическая сборка **TOSA** (**Transmitter Optical Sub-Assembly**), приемная оптическая сборка **ROSA** (**Receiver Optical Sub-Assembly**) контроллер оптического тракта (**MCU**), из-

мерительные датчики (Temp sense) и подсистема цифровой диагностики (DDM). Такое представление позволяет перейти от внешнего описания диагностических параметров к анализу их физического происхождения внутри модуля.

Встроенная цифровая диагностика DDM опирается на измерительные каналы, связанные с TOSA, ROSA, цепями питания и температурного контроля. Полученные аналоговые сигналы оцифровываются, калибруются и представляются внешнему оборудованию через двухпроводной управляющий интерфейс, совместимый с I²C. В спецификации SFF-8472 для SFP/SFP+ модулей определена организация диагностической памяти (рис. 2), включающей текущие значения температуры, напряжения питания, тока смещения лазерного диода, передаваемой и принимаемой оптической мощности, а также пороги предупреждения и аварии. Эти значения имеют различное физическое происхождение, однако в интерфейсе модуля представлены в единой форме как цифровые данные, доступные для считывания внешним оборудованием и сравнения с заданными порогами warning/alarm [3].

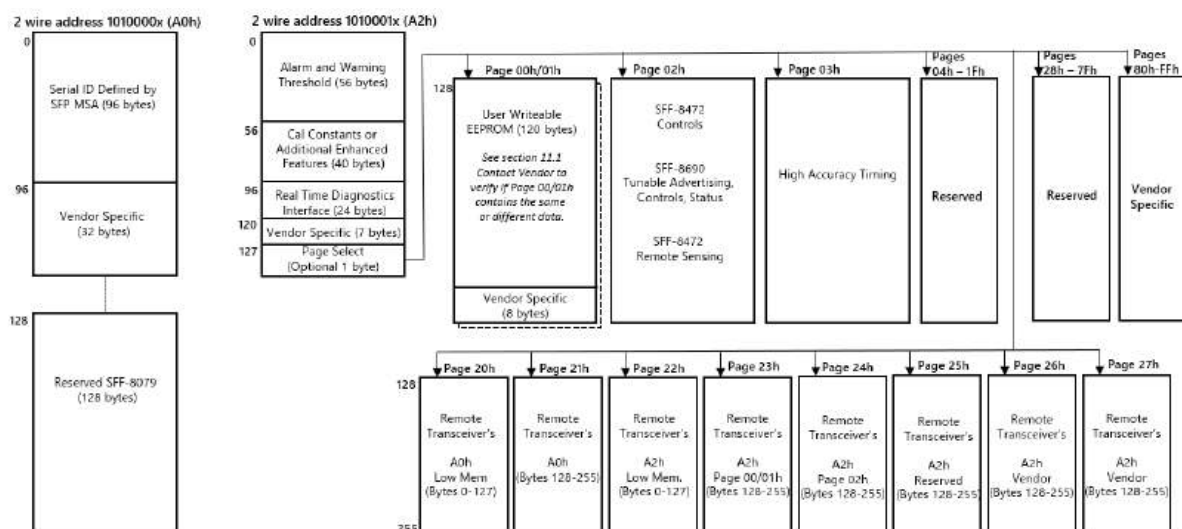


Рис. 2. Структура адресного пространства двухпроводного интерфейса SFP/SFP+ модуля в соответствии со спецификацией SFF-8472

Как видно из рис. 2, адресное пространство модуля разделяется на несколько функциональных областей. Область с адресом A0h используется преимущественно для хранения идентификационных данных трансивера, включая сведения, определяемые SFP MSA. Область с адресом A2h связана с цифровым диагностическим мониторингом: в ней размещаются пороги

предупредительных и аварийных состояний, калибровочные константы и текущие диагностические значения. Таким образом, интерфейс I²C/EEPROM является связующим уровнем между внутренними измерительными цепями трансивера и внешней системой контроля.

Интерфейс I²C/EEPROM задает способ доступа к диагностической информации, но не объясняет ее физическое происхождение. Рассмотрим внутреннюю измерительную цепочку на примере TOSA и получения данных об уровне передаваемого сигнала.

Как показано на рис. 1 и рис. 3, передающая оптическая сборка TOSA содержит не только лазерный диод LD, формирующий выходное излучение TX, но и мониторингный фотодиод PD. Часть оптического излучения лазера попадает на PD, в результате чего возникает фототок, связанный с уровнем передаваемой оптической мощности. Этот сигнал используется как первичный аналоговый источник данных для подсистемы цифровой диагностики. Кроме того, он включен в контур обратной связи передающего тракта: по сигналу мониторингового фотодиода схема Power Control совместно с Laser Driver стабилизирует среднюю излучаемую мощность лазерного диода.

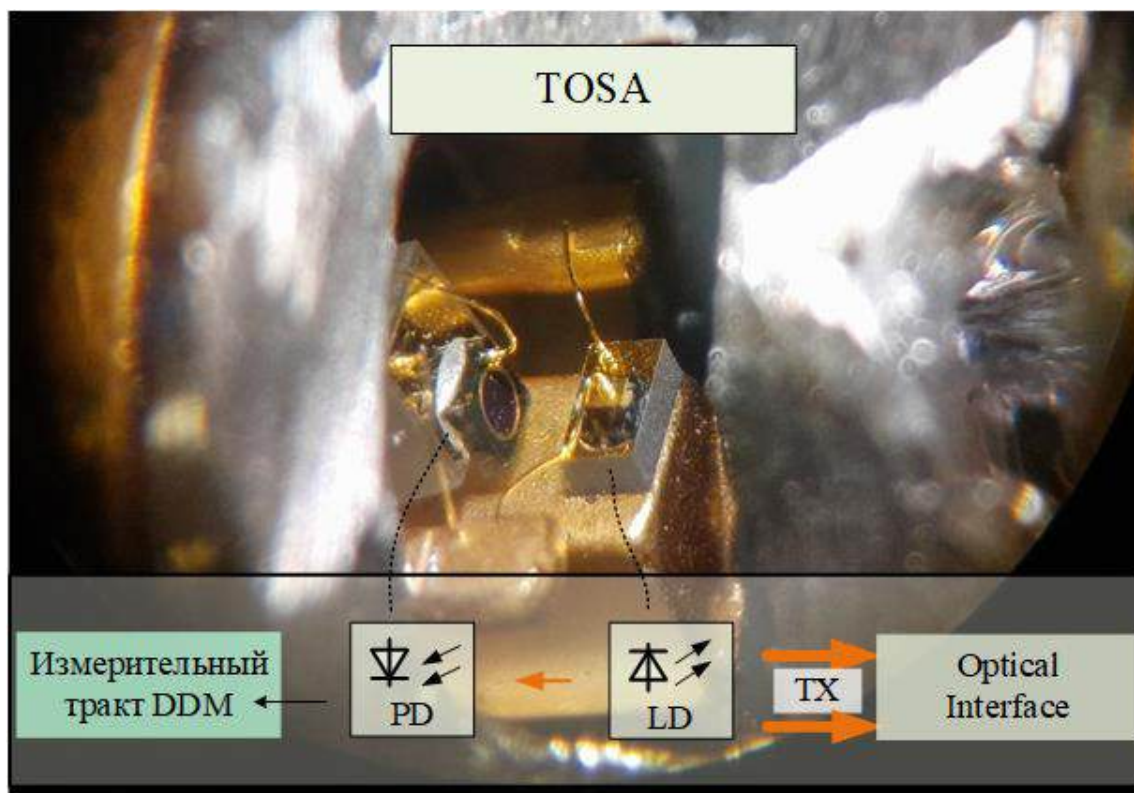


Рис. 3. Микрофотография передающей оптической сборки TOSA с пояснением формирования диагностического сигнала

Фототок мониторного фотодиода в измерительном тракте DDM преобразуется в напряжение, согласованное с диапазоном АЦП, затем оцифровывается и обрабатывается контроллером модуля. После применения калибровочных коэффициентов результат записывается в диагностическую память по определенному адресу. Для SFP/SFP+ модулей текущее значение передаваемой оптической мощности размещается в области диагностической памяти A2h, по адресам 102–103 (MSB, LSB), соответствующим полю TX Optical Power. Внешнее оборудование считывает эти байты через интерфейс I²C/EEPROM и интерпретирует их как значение передаваемой оптической мощности с учетом формата представления и калибровки модуля. В результате поле TX Optical Power в диагностической памяти трансивера отражает результат физического измерения оптической мощности внутри TOSA.

Рассмотренный пример показывает общий принцип построения подсистемы цифровой диагностики: диагностический параметр должен быть связан с конкретным физическим источником сигнала. Разработка DDM не сводится к формальному заполнению регистров EEPROM. Она требует формирование измерительного тракта, согласования оптоэлектронных узлов модуля, аналоговых измерительных цепей, АЦП, встроенного контроллера и управляющего интерфейса, а также выполнение процедур калибровки.

Достоверность диагностических данных определяется качеством реализации всей измерительной цепочки внутри модуля. Целесообразно разрабатывать подсистему DDM не только как средство формирования сигналов предупреждения и аварии при превышении заданных порогов, но и как источник данных для эксплуатационной аналитики. Накопление и анализ этих данных во времени позволяют выявлять медленные изменения режима работы трансивера и волоконно-оптического тракта: снижение передаваемой и принимаемой оптической мощности, рост тока смещения лазера, изменение температурного режима оборудования и приближение параметров к допустимым границам. Подсистему цифровой диагностики следует рассматривать не как вспомогательную сервисную функцию волоконно-оптических приемопередающих модулей, а как часть архитектуры современной оптической сети, обеспечивающую наблюдаемость канала и раннее выявление деградационных процессов до возникновения отказа.

Список используемых источников

1. SFP (Small Formfactor Pluggable) Transceiver. INF-8074i Rev. 1.0. SFF Committee, 2000.

2. SFF-8431. Specification for SFP+ 10 Gb/s and Low Speed Electrical Interface. Rev. 4.1. SFF Committee, 2009.
3. SFF-8472 Rev 12.5a. Management Interface for SFP+ / SNIA, January 16, 2026

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации, соглашение № 071-03-2026-010, «Разработка фрагмента перспективной сети связи на новых принципах меж-сетевого обмена для обеспечения технологического лидерства России»

DEVELOPMENT AND APPLICATION OF A DIGITAL DIAGNOSTIC MONITORING SUBSYSTEM FOR FIBER-OPTIC TRANSCEIVER MODULES

Diubov A.

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

The article considers the digital diagnostic subsystem of fiber-optic transceiver modules. It is shown that the diagnostic parameters of a module are associated with physical signals generated in internal optoelectronic units, measurement circuits, and control circuits. A structural model of an optical transceiver is presented, with the transmitter and receiver optical subassemblies, controller, non-volatile memory, and digital diagnostic block identified. The organization of the diagnostic memory is considered. The formation of transmitted optical power data based on the monitor photodiode signal in the transmitter optical subassembly is shown. The reliability of digital diagnostics is determined by the quality of the measurement path implementation, calibration, and consideration of operating conditions. With proper development of the digital diagnostic subsystem, the measured data obtained from the module can be used not only to generate warning and alarm signals, but also to analyze changes in the state of the transceiver and the fiber-optic channel over time.

Key words: *fiber-optic transceiver module, digital diagnostics, optical power monitoring, operational analytics, fiber-optic communication line, optical interface*

УДК 535.8
ГРНТИ 29.31.29**ПРОГРАММНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКОГО
ФУРЬЕ-ПРОЦЕССОРА ДЛЯ ЗАДАЧ КОРРЕЛЯЦИОННОГО
АНАЛИЗА ИЗОБРАЖЕНИЙ****А. С. Дюбов, С. В. Колпаков, С. А. Рогов**

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В докладе рассматривается численное моделирование оптического фурье-процессора для корреляционного анализа изображений и сигналов. Модель воспроизводит основные этапы работы оптического коррелятора совместного преобразования: формирование входного пространственного сигнала в виде совместной сцены «объект – эталон», расчет комплексного оптического сигнала в фокальной плоскости, получение его распределения интенсивности, моделирование регистрации сигнала фотодетекторной матрицей и последующее формирование выходного сигнала в плоскости корреляции. Уделяется внимание связи между физической схемой оптического процессора и ее программной реализацией. В качестве демонстрационных объектов используются синтетические транспаранты и изображения с заданной пространственной структурой, включая пары символов, периодические структуры и простые геометрические объекты.

оптическая обработка изображений, оптический фурье-процессор, коррелятор совместного преобразования, пространственный спектр, транспарант, фотодетекторная матрица, численное моделирование

Задача корреляционного анализа изображений состоит в определении степени сходства между исследуемым объектом и заранее заданным эталоном. Она возникает в системах технического зрения при распознавании объектов, контроле формы и положения деталей, анализе навигационных и картографических данных, а также при обработке одномерных пространственных сигналов. В отличие от простой регистрации изображения, корреляционная обработка направлена на выявление признака соответствия между входным распределением и заданным образцом. Поэтому она представляет интерес для систем, где требуется быстро сравнивать двумерные изображения или одномерные пространственные сигналы по их структуре.

Одним из базовых элементов таких систем является оптический фурье-процессор. В его простейшей схеме входной транспарант, линза и фотодетекторная матрица, установленная в задней фокальной плоскости линзы, образуют систему пространственно-частотного анализа изображения, рис. 1.

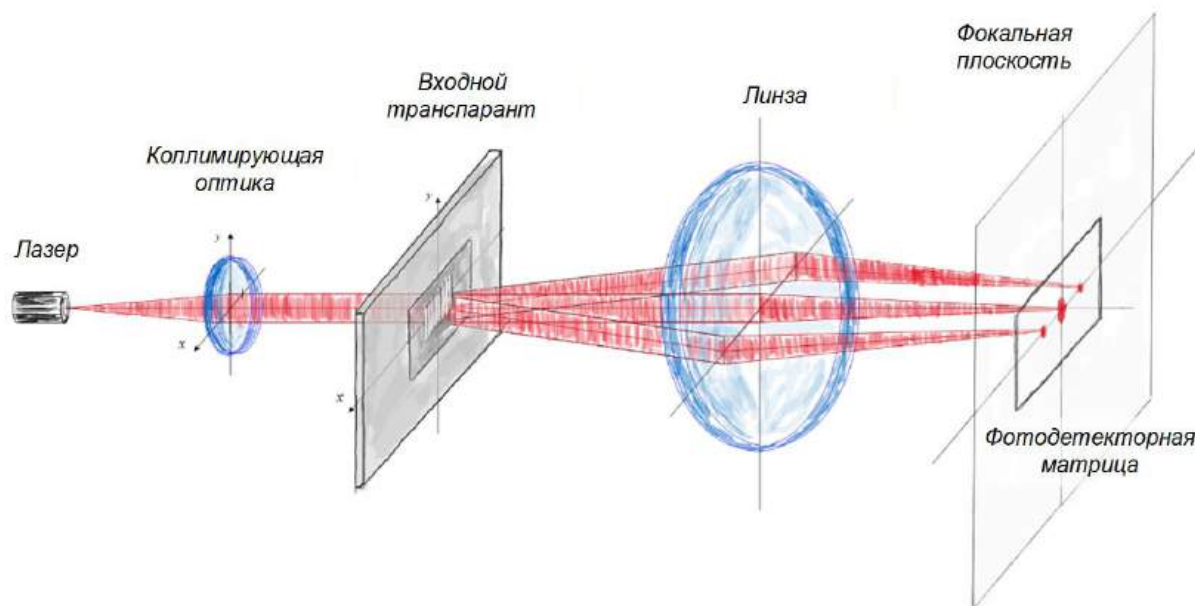


Рис. 1. Схема оптического фурье-процессора с регистрацией распределения интенсивности в фокальной плоскости линзы

Лазерный источник формирует когерентное монохроматическое излучение, которое после коллимирующей оптики преобразуется в пучок, близкий к плоской волне. Эта волна освещает входной транспарант, задающий пространственное распределение пропускания [1].

Пространственная структура транспаранта модулирует проходящее поле, поэтому за ним возникают дифрагированные компоненты, распространяющиеся под различными углами. На рис. 1 для наглядности показаны три основные компоненты: недифрагированная, идущая вдоль оптической оси, и две боковые компоненты. Линза преобразует их угловое разделение в координатное разделение в задней фокальной плоскости, где фотодетекторная матрица регистрирует соответствующее распределение интенсивности [2, 3].

В программной модели процессы и элементы оптической схемы представлены этапами расчета с задаваемыми исходными данными и параметрами. Лазерный источник характеризуется длиной волны излучения и мощностью освещающего пучка. Изображение, выводимое на транспарант, рассматривается как двумерное распределение амплитудного пропускания. Освещение транспаранта в программе эквивалентно формированию входного распределения поля перед линзой. Действие линзы моделируется расчетом преобразования Фурье этого распределения, в результате чего определяется комплексное поле в задней фокальной плоскости. Фотодетекторная матрица представлена операцией вычисления интенсивности и дискретизацией полученного распределения. Такой подход позволяет сохранить связь между физической схемой фурье-процессора и ее численной реализацией.

В качестве тестового примера рассматривалась схема с лазерным источником излучения длиной волны 650 нм. После коллимирующей оптики пучок освещал входной транспарант размером 768×1024 пикселя. На транспаранте была задана прямоугольная область размером 200×400 пикселей, внутри которой амплитудное пропускание изменялось по горизонтальной координате по синусоидальному закону. Период синусоиды составлял 24 пикселя, что при шаге дискретизации транспаранта 8 мкм соответствует физическому периоду 192 мкм и пространственной частоте 5208 1/м. После прохождения транспаранта поле содержит нулевую компоненту и две боковые компоненты, соответствующие положительной и отрицательной пространственной частоте по горизонтальной координате. Линза с фокусным расстоянием 0,5 м формирует эти компоненты в задней фокальной плоскости, где расположена фотодетекторная матрица размером 768×1024 пикселя с шагом пикселя 5 мкм. Для заданных параметров смещение первого порядка от центра составляет около 1,69 мм, или 338,5 пикселя на матрице. Поэтому при ширине изображения 1024 пикселя максимумы должны находиться примерно в точках 174, 513 и 851 пиксель по горизонтали. Полученное в модели изображение фотодетекторной матрицы соответствует этому расчету: синусоидальная пространственная частота, заданная по горизонтали входного транспаранта, проявляется в виде двух спектральных максимумов по горизонтальной координате в фокальной плоскости. Это показывает, что регистрируемое распределение является именно пространственным спектром входного изображения. Результаты моделирования приведены на рис. 2.

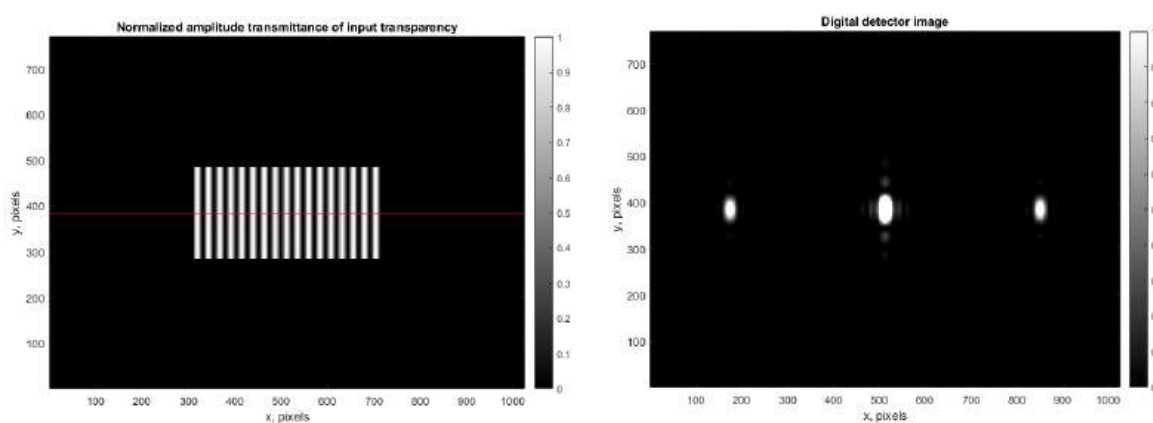


Рис. 2. Результат моделирования формирования пространственного спектра: слева – нормированное амплитудное пропускание входного транспаранта, справа – цифровое изображение фотодетекторной матрицы в фокальной плоскости линзы

Полученный результат соответствует работе оптического Фурье-процессора: входное распределение на транспаранте преобразуется линзой в пространственный спектр, регистрируемый фотодетекторной матрицей. Для перехода к корреляционной обработке на входной транспарант выводится совместная сцена, содержащая исследуемый объект и эталон.

В качестве демонстрационного примера рассмотрены две сцены, сформированные из пар символов «АА» и «АВ». В первом случае объект и эталон совпадают, во втором – имеют различную пространственную структуру. После прохождения линзы в фокальной плоскости для каждой сцены формируется совместный спектр, а фотодетекторная матрица регистрирует распределение его интенсивности, рис. 3.

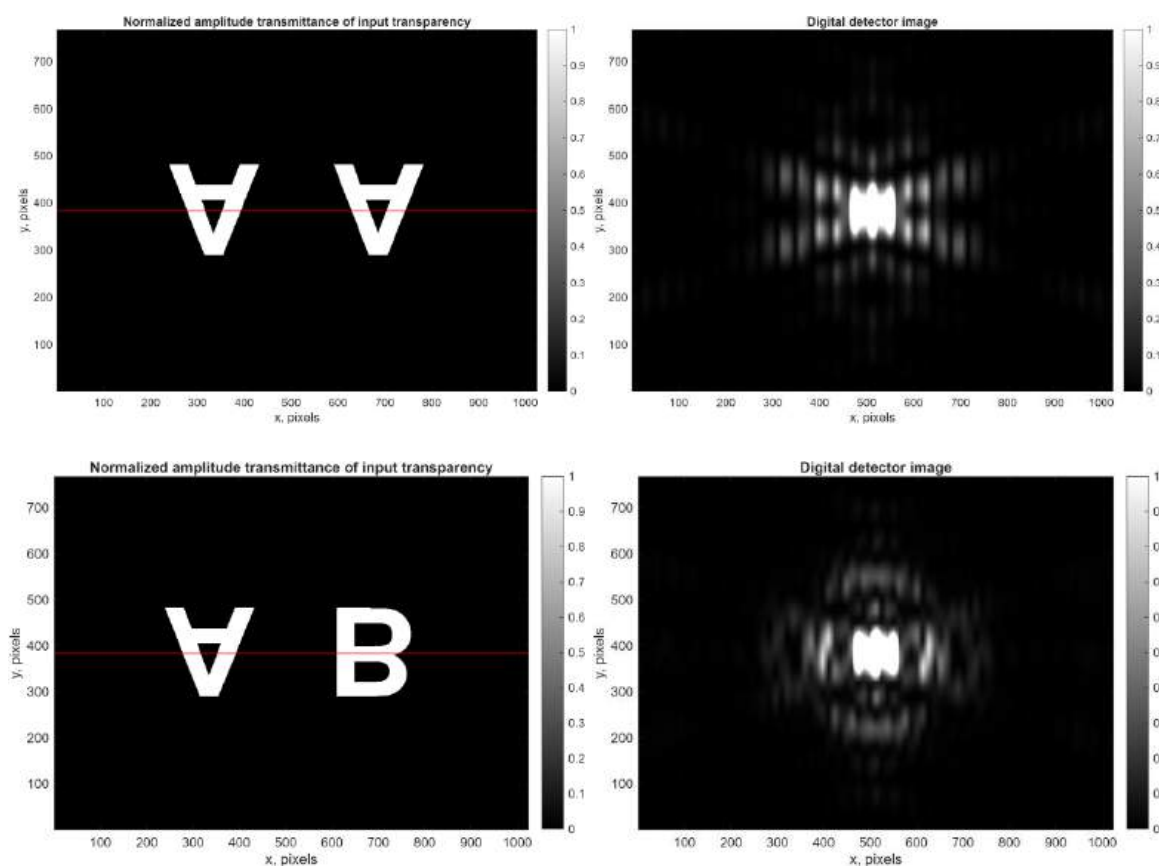


Рис. 3. Результат моделирования формирования совместного спектра: слева – нормированное амплитудное пропускание входного транспаранта, справа – соответствующее цифровое изображение фотодетекторной матрицы в фокальной плоскости линзы

Зарегистрированное распределение интенсивности совместного спектра далее используется как новый транспарант и подвергается повторной фурье-обработке. В результате преобразования Фурье полученного совместного спектра, фотодетекторная матрица регистрирует распределение

интенсивности корреляционных максимумов, по величине которых можно судить о степени схожести входных изображений. На рис. 4 приведены распределения интенсивности в плоскости корреляции и горизонтальные профили сечений корреляционного отклика.

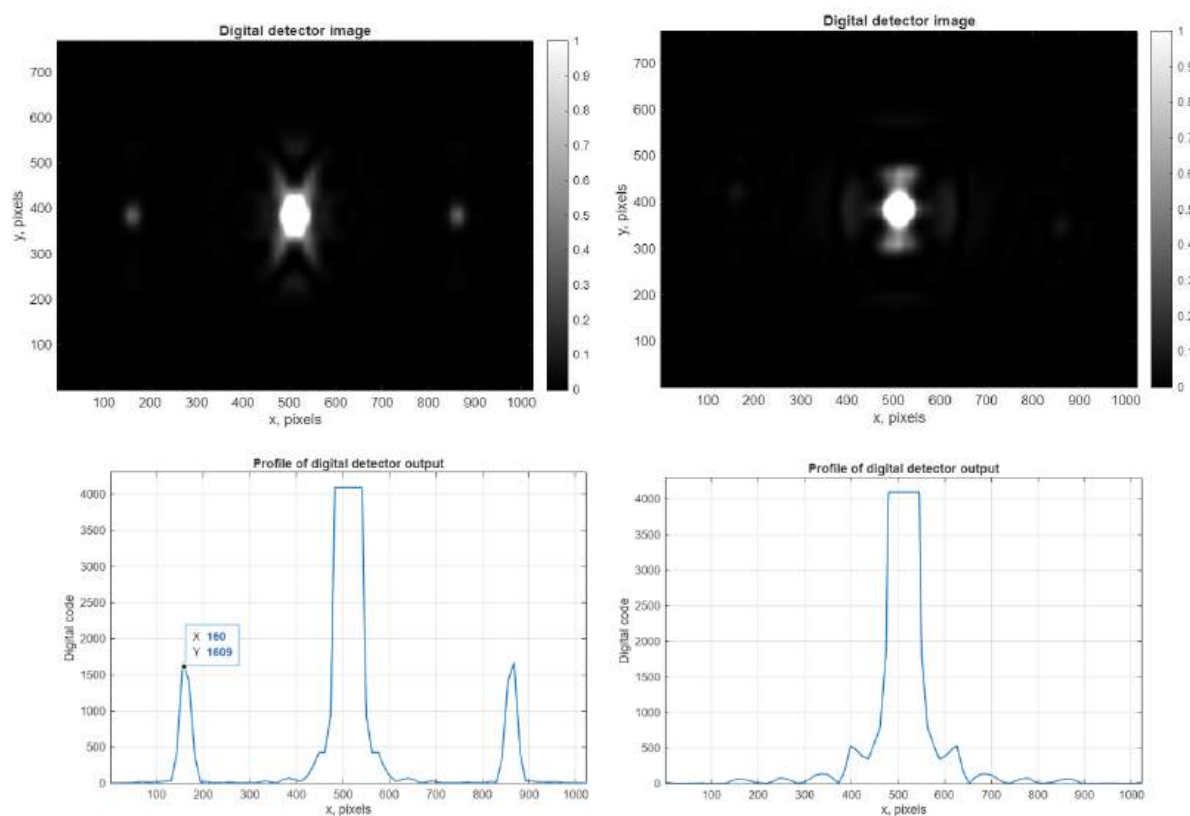


Рис. 4 Результат моделирования корреляционной обработки сцен «АА» (слева) и «АВ» (справа)

Для совпадающих изображений в совместной сцене корреляционные составляющие выражены сильнее. Это показывает, что модель реагирует не только на наличие двух объектов во входной сцене, но и на степень их пространственного сходства. Разработанная модель может использоваться как инструмент предварительного численного исследования режимов работы оптического коррелятора, выбора параметров оптической схемы и подготовки лабораторного эксперимента.

Список используемых источников

1. Оптическая обработка информации. Применения. / Под ред. Д. Кейсесента: Пер. с англ. М.: Мир, 1980. 350 с.
2. Кузьмин М.С., Рогов С.А. Оптический фурье-процессор с жидкокристаллическим устройством ввода информации // Оптический журнал. 2015. Т. 82. № 3. С. 23–29.

3. Дюбов А. С., Кузьмин М. С., Рогов С. А. Динамический диапазон когерентного оптического спектроанализатора с жидкокристаллической матрицей для ввода сигналов // Оптический журнал. 2023. Т. 90. № 2. С. 78–88.

SOFTWARE SIMULATION OF AN OPTICAL FOURIER PROCESSOR FOR IMAGE CORRELATION ANALYSIS

Diubov A., Kolpakov S., Rogov S.

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

The report considers numerical modeling of an optical Fourier processor for correlation analysis of images and signals. The model reproduces the main stages of a joint transform optical correlator: formation of an input spatial signal as a joint “object–reference” scene, calculation of the complex optical field in the focal plane, determination of its intensity distribution, simulation of signal registration by a photodetector array, and subsequent formation of the output signal in the correlation plane. Particular attention is paid to the relationship between the physical scheme of the optical processor and its software implementation. Synthetic transparencies and images with prescribed spatial structure, including pairs of symbols, periodic structures, and simple geometric objects, are used as demonstration objects.

Key words: optical image processing, optical Fourier processor, joint transform correlator, spatial spectrum, transparency, photodetector array, numerical modeling

УДК 621.39
ГРНТИ 49.37.29

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ АРХИТЕКТУРНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ГИБРИДНЫХ СЕТЕЙ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ СЕРВИСОВ В СООТВЕТСТВИИ С РЕКОМЕНДАЦИЯМИ ITU-T

В. С. Елагин, С. А. Поляков

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В статье рассматриваются особенности архитектуры гибридных сетей и их влияние на качество обслуживания (QoS) различных типов сервисов. Проведен анализ рекомендаций Международного союза электросвязи (ITU-T), в частности Y.1540, Y.1541, G.1000, определяющих классы качества для IP-сетей. Исследованы ключевые сетевые параметры: задержка передачи пакетов, вариация задержки (джиттер), коэффициент потерь пакетов и доступность службы. Представлена классификация сервисов для гибридных сетей в соответствии с классами обслуживания ITU-T. Выявлены основные проблемы обеспечения гарантированных характеристик качества в условиях гетерогенной сетевой инфраструктуры.

гибридные сети, качество обслуживания, QoS, ITU-T, классы обслуживания, задержка, джиттер, потери пакетов

Введение

Современные телекоммуникационные системы характеризуются высокой степенью гетерогенности и динамичности. Пользователи ожидают бесперебойного доступа к сервисам независимо от типа сетевого подключения – будь то проводная сеть Ethernet, беспроводная сеть Wi-Fi, сотовая связь 4G/5G или спутниковый канал. Конвергенция различных технологий доступа привела к распространению гибридных сетей, которые объединяют в себе преимущества множественных технологий передачи данных [1].

Исходя из этого встает вопрос, как обеспечить затрудняет обеспечение стабильного и предсказуемого качества обслуживания (Quality of Service, QoS) в неоднородных гибридных сетях. Использование различных технологий передачи данных, сетевых протоколов и каналов связи усложняет контроль ключевых показателей производительности сети и требует применения дополнительных механизмов управления трафиком, например ошибки, допущенные при проектировании или эксплуатации гибридной сети, могут привести к заметному снижению качества предоставляемых услуг. Согласно данным Gartner, стоимость одной минуты простоя критически важной ИТ-инфраструктуры для

крупных компаний может составлять от 5 до 100 тыс. долларов США в зависимости от отрасли [2]. Возникает необходимость стандартизации подходов к оценке и обеспечению качества обслуживания в гибридных сетях.

Архитектурные особенности гибридных сетей

Под гибридной сетью в современном понимании следует считать телекоммуникационную инфраструктуру, которая интегрирует несколько разнородных технологий доступа и передачи данных в единую логическую систему [3]. Гибридные сети могут включать следующие компоненты:

- фиксированные сети доступа: оптоволоконные линии, медные линии (xDSL), Ethernet;
- мобильные сети: сотовые технологии 4G, 5G;
- беспроводные локальные сети: Wi-Fi;
- спутниковые каналы связи: геостационарные (GEO) и низкоорбитальные (LEO) спутниковые системы;
- частные сети: промышленные сети на базе TSN (Time-Sensitive Networking), LoRaWAN, NB-IoT.

Конвергенция фиксированных и мобильных сетей (Fixed-Mobile Convergence, FMC) представляет собой один из ключевых трендов развития гибридных инфраструктур. Технология FMC позволяет пользователю беспрепятственно переключаться между сетями без разрыва сессии, что особенно важно для мобильных сервисов [4].

Ключевые параметры производительности сети

Рассмотрим рекомендации Y.1540 и ее основные параметры [5]:

1. Задержка передачи IP-пакета (IP Packet Transfer Delay, IPTD). Определяется как время между моментом входа пакета в сеть и моментом его выхода из сети.

2. Вариация задержки передачи IP-пакета (IP Packet Delay Variation, IPDV). Определяется как разница в задержках между последовательными пакетами одного потока. Высокий джиттер требует использования буферов на приемной стороне, что увеличивает общую задержку.

3. Коэффициент потерь IP-пакетов (IP Packet Loss Ratio, IPLR). Отношение количества потерянных пакетов к общему количеству отправленных пакетов. Потери могут возникать из-за переполнения буферов, ошибок в канале передачи или истечения времени жизни пакета (TTL).

4. Доступность службы (IP Service Availability). Доля времени, в течение которого служба соответствует заданным параметрам качества. Измеряется в процентах за определенный период (обычно месяц или год).

Классы обслуживания по рекомендации Y.1541

Рекомендация ITU-T Y.1541 определяет шесть классов качества обслуживания для сетевого уровня [6]. Каждый класс характеризуется предельными значениями параметров IPTD, IPDV и IPLR. Подробные характеристики классов приведены в таблице 1.

ТАБЛИЦА 1. Классы качества обслуживания по ITU-T Y.1541

Класс	Назначение	Макс. задержка (мс)	Макс. джиттер (мс)	Макс. потери	Доступность
Class 0	Реальное время, высший приоритет	100	50	10^{-5}	99.999 %
Class 1	Реальное время, интерактивный	400	50	10^{-5}	99.9 %
Class 2	Транзакционные данные	400	—	10^{-5}	99.9 %
Class 3	Приложения с гарантированной доставкой	4000	—	10^{-5}	99.9 %
Class 4	Приложения с низкой потерей	4000	—	10^{-3}	99.9 %
Class 5	Best Effort (без гарантий)	—	—	—	—

Анализ типов сервисов для гибридных сетей в соответствии с QoS

Анализ типов сервисов в гибридных сетях показывает, что требования к качеству обслуживания (QoS) существенно различаются в зависимости от характера трафика. Сервисы реального времени, такие как VoIP и видеоконференции, требуют минимальной задержки и низкого джиттера, поскольку даже кратковременные перебои могут нарушить коммуникацию. В гибридной сети вертикальный хендовер между Wi-Fi и сотовой сетью способен

временно увеличивать задержку и вызывать потерю пакетов. Для снижения этих эффектов применяются такие механизмы, как быстрая аутентификация (802.11r для Wi-Fi), предварительная регистрация в целевой сети, буферизация пакетов на границе сети и адаптивные кодеки, подстраивающие битрейт под текущую пропускную способность.

Сводная таблица требований различных типов сервисов к параметрам QoS выглядит следующим образом (табл. 2).

ТАБЛИЦА 2. Требования сервисов к параметрам QoS

Тип сервиса	Задержка (мс)	Джиттер (мс)	Потери	Класс ITU-T
VoIP	≤ 150	≤ 50	$\leq 1\%$	Class 0-1
Видеоконференции	≤ 200	≤ 50	$\leq 1\%$	Class 0-1
IPTV / Streaming	≤ 4000	≤ 100	$\leq 0.1\%$	Class 2-3
Промышленный IoT	≤ 10	≤ 5	$\leq 0.001\%$	URLLC
Web-серфинг	≤ 4000	–	–	Class 5
Email / Файлы	–	–	–	Class 5

Механизмы обеспечения характеристик в гибридной среде

Переходя к вопросу о том, как именно обеспечиваются требуемые характеристики в гибридных сетях, необходимо отметить, что современная сетевая инфраструктура сталкивается с беспрецедентно разнообразными требованиями. Один и тот же физический канал должен одновременно передавать видеоконференцию в 4К, критически важные данные промышленного контроллера и фоновую синхронизацию облачных хранилищ. Для решения этой задачи был разработан комплекс взаимодополняющих механизмов, которые рассмотрены далее.

Программно-конфигурируемые сети (SDN). представляют собой фундаментальный сдвиг в архитектуре управления сетями. Традиционный подход, когда каждое сетевое устройство принимает решения о маршрутизации автономно, уступает место централизованному контролю. Контроллер SDN получает глобальное представление о состоянии всей сети – загрузке каналов, доступной пропускной способности, текущих задержках.

Сетевое срезание (Network Slicing). Реализуется в стандарте 5G, развивает эту логику дальше. Технология позволяет создавать множественные логические сети поверх единой физической инфраструктуры. Каждый такой «срез» изолирован от других и имеет собственные выделенные ресурсы, параметры безопасности и качества обслуживания.

Приоритизация трафика. Представляет собой более традиционный, но по-прежнему актуальный уровень обеспечения характеристик. Если SDN и Network Slicing работают на архитектурном уровне, то механизмы приоритизации функционируют непосредственно с пакетами данных. Технология DiffServ маркирует пакеты на границе сети, присваивая им класс обслуживания, после чего сетевое оборудование обрабатывает их соответствующим образом. MPLS идет дальше, создавая помеченные пути с гарантированными параметрами через всю сеть провайдера. На уровне локальных сетей работает стандарт 802.1p/Q, позволяющий приоритезировать трафик непосредственно в Ethernet-кадрах.

Адаптивные механизмы компенсации. Даже при идеальной архитектуре и приоритизации, физические факторы (помехи в беспроводном канале, перегрузка магистралей, отказы оборудования) вызывают вариации задержки и потерю пакетов (табл. 3). Для компенсации этих эффектов применяется комплекс мер на уровне приложений и транспорта.

Таблица 3. Сравнительная характеристика механизмов адаптивной компенсации

Механизм компенсации	Преимущества	Недостатки	Область применения
Буферы джиттера	Простота реализации	Добавляет задержку	Медиастриминг, VoIP
Адаптивные кодеки	Гибкость, эффективность	Снижение качества при перегрузке	Видеоконференции, стриминг
FECS (избыточное кодирование)	Восстановление без ретрансмиссии	Увеличивает объем трафика	Спутниковая связь, вещание
Мультипутевая передача	Высокая надежность	Требует несколько каналов	Критические системы, military

Исходя из этого, можем сделать вывод, что обеспечение характеристик в гибридной среде достигается не одним универсальным решением, а комбинацией механизмов разного уровня – от архитектурных (SDN, срезание) через транспортные (приоритизация) до прикладных (адаптивная компенсация), а выбор конкретной комбинации определяется требованиями приложения, экономической целесообразностью и физической доступностью инфраструктуры.

Заключение

В статье проанализировано влияние архитектурных особенностей гибридных сетей на качество обслуживания сервисов. Гетерогенность сетей создает вызовы для обеспечения предсказуемого QoS из-за различий в задержках, пропускной способности и механизмах управления между сегментами. Рекомендации ITU-T (Y.1540, Y.1541) предоставляют систему из шести классов обслуживания (Class 0-5) для стандартизации требований к трафику. Сервисы реального времени требуют задержки менее 150-200 мс, тогда как потоковые сервисы критичны к потерям пакетов. Для обеспечения характеристик применяются технологии SDN, Network Slicing и приоритизация трафика (DiffServ, MPLS). Перспективы развития связаны с интеграцией искусственного интеллекта для оптимизации маршрутизации. Остаются нерешенные задачи координации политик QoS между доменами и стандартизации вертикального хендвера.

Список используемых источников

1. Минаев, В. Г. Конвергенция телекоммуникационных сетей. Москва: Горячая линия – Телеком. 2020. 352 с.
2. Gartner. Cost of Downtime: How Much Does IT Outage Cost Your Business? Gartner Research. 2023. URL: <https://www.gartner.com/en/documents> (дата обращения: 15.02.2026).
3. Олифер В. Г., Олифер Н. А. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы (5-е изд.). Санкт-Петербург: Питер. 2021. 992 с.
4. 3GPP. TS 23.501: System Architecture for the 5G System (5GS). Release 17. 2022.
5. ITU-T. Recommendation Y.1541: Network performance objectives for IP-based services. February 2012. 46 p.
6. ITU-T Recommendation Y.1540 (11/2011): IP packet transfer and availability performance parameters. Geneva: International Telecommunication Union, 2011. 32 p.

**ANALYSIS OF THE IMPACT OF HYBRID NETWORK ARCHITECTURAL
FEATURES ON SERVICE CHARACTERISTICS IN ACCORDANCE WITH ITU-T
RECOMMENDATIONS**

Elagin V., Polyakov S.

The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunication

The article examines the architectural features of hybrid networks and their impact on the quality of service (QoS) of various types of services. An analysis of the International Telecommunication Union (ITU-T) recommendations, particularly Y.1540, Y.1541, G.1000, defining quality classes for IP networks, is carried out. Key network parameters are investigated: packet transfer delay, delay variation (jitter), packet loss ratio, and service availability. A classification of services for hybrid networks in accordance with ITU-T service classes is presented. The main problems of ensuring guaranteed quality characteristics in a heterogeneous network infrastructure are identified.

Key words: *hybrid networks, quality of service, QoS, ITU-T, service classes, delay, jitter, packet loss*

УДК 004.8:004.738.5:621.396

ГРНТИ 50.07.17, 50.07.35, 28.23.15, 27.39.19

**КОНВЕРГЕНЦИЯ ТЕХНОЛОГИЙ AI, SON И IOT: ПАТТЕРНЫ,
МЕТРИКИ И ГЛОБАЛЬНЫЕ ТРЕНДЫ С ФОКУСОМ НА РОССИЮ****А. Д. Ерофеев, О. И. Пантюхин**

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В статье исследуется триада ключевых технологий современной цифровой трансформации: интернет вещей, искусственный интеллект и самоорганизующиеся сети. Цель работы – выявить системные паттерны их конвергенции, предложить метрики для измерения уровня их интеграции и провести сравнительный анализ состояния и динамики развития этой триады в глобальном масштабе и в Российской Федерации. Установлено, что движущим паттерном является создание «цифровых контуров с обратной связью», где IoT выступает как сенсорная и исполнительная система, SON – как автономная сетевая нервная система, а AI – как когнитивный центр управления. Россия демонстрирует сильные компетенции в изолированных сегментах (теоретическая AI, специфический IoT), но отстает в массовой коммерциализации и создании комплексных кросс-отраслевых экосистем, характерных для глобальных лидеров.

искусственный интеллект, AI, Self-Organizing Networks, SON, Интернет вещей, IoT, конвергенция технологий, цифровая трансформация, индустрия 4.0, умные сети

Современный технологический ландшафт определяется не отдельными прорывами, а их синергией [1, 2]. Три технологии –IoT (Интернет вещей), AI (Искусственный интеллект, в частности машинное обучение) и SON (Self-Organizing Networks – самоорганизующиеся сети) – формируют инфраструктурный стек для построения автономных, адаптивных и интеллектуальных систем. Если IoT генерирует «сырые данные» из физического мира, а SON обеспечивает их бесперебойную, гибкую и эффективную передачу, то AI превращает эти данные в решения, действия и новые знания [3]. Их взаимосвязь перестает быть опциональной и становится императивом для развития телекоммуникаций, умных городов, промышленности (Индустрия 4.0), транспорта и здравоохранения [4].

Анализ позволяет выделить три фундаментальных паттерна, объединяющих AI, SON и IoT:

1. Паттерн «Цифровой контур с обратной связью» (Digital Feedback Loop) – это базовый архитектурный паттерн [5]. IoT-сенсоры собирают дан-

ные о состоянии сети (SON), окружающей среды или промышленного процесса (IoT). Сеть (SON) доставляет эти данные в AI-платформу с минимальной задержкой и максимальной надежностью, адаптируя свои параметры (например, выделяя приоритетный трафик). AI-модели анализируют данные в реальном времени, выявляют аномалии, прогнозируют события и генерируют управляющие команды. Команды передаются обратно через SON к IoT-актуаторам (исполнительным устройствам) или напрямую для настройки параметров сети. Пример: в умной энергосети датчики (IoT) фиксируют пик потребления, AI перераспределяет нагрузку и дает команду на включение резервных источников, а SON (в данном случае – сети связи для АСУ ТП) обеспечивает критически важную связь между элементами [6].

2. Паттерн «Контекстно-зависимая сетевая инфраструктура» (Context-Aware Networking). SON, обогащенная AI, перестает быть просто каналом передачи, а становится интеллектуальным посредником, понимающим контекст передаваемых данных IoT [7]. AI классифицирует трафик от миллионов IoT-устройств (видеокамеры, датчики вибрации, медицинские сенсоры). SON динамически выделяет ресурсы: низкую латентность для беспилотного транспорта, высокую пропускную способность для потокового видео с камер наблюдения, энергоэффективный режим для датчиков с батарейным питанием. Паттерн заключается в переходе от «Best Effort» к «Intent-Based Networking», где сеть автоматически подстраивается под намерения и потребности сервисов [8].

3. Паттерн «Распределенный интеллект на границе сети» (Edge AI + IoT + SON). Рост числа IoT-устройств делает неэффективной передачу всех данных в центральное облако. Ключевой паттерн – распределение AI-вычислений [9]. AI-алгоритмы (упрощенные модели) работают непосредственно на IoT-шлюзах или даже устройствах (TinyML). SON (в частности, архитектуры Mobile Edge Computing – MEC) обеспечивает связь между этими распределенными узлами и ядром сети, создавая гибкую вычислительную ткань [10]. Результатом будет являться снижение задержки (критично для AR/VR, промышленного IoT), экономия полосы пропускания и повышение конфиденциальности данных.

Для оценки конвергенции необходимы комплексные метрики, выходящие за рамки оценки технологий по отдельности [11].

ТАБЛИЦА 1. Метрики измерения и соотнесения развития триады

Категория метрик	Конкретные показатели	Что измеряет в контексте триады
Инфраструктурная зрелость	Плотность покрытия сетей 5G/6G (с поддержкой SON). Количество развернутых MEC-узлов. Доля сетевого оборудования с поддержкой AI-driven SON	Готовность сети (SON) выступать как платформа для IoT и AI
Экосистемная интеграция	Количество коммерческих решений, заявленных как «AIoT» (AI+IoT). Наличие открытых API между платформами IoT, AI и операторов связи. Количество кросс-отраслевых проектов (умный город, цифровое здравоохранение), использующих все три компонента	Уровень синергии на рынке и в практических внедрениях
Экономический и инновационный эффект	Объем рынка решений, основанных на конвергенции (в стоимостной оценке). Количество патентов, затрагивающих минимум две технологии из триады. Доля AI-моделей в телекоме, обученных на данных IoT	Практическую ценность и интеллектуальную динамику развития
Производительность системы	Сквозная задержка (E2E Latency) в цепочке IoT-сенсор→Сеть→AI-решение→IoT-актуатор. Коэффициент автономности сети (доля решений, принятых AI-SON без вмешательства человека). Точность прогнозных моделей AI, работающих на сетевых данных (Traffic Forecasting, Anomaly Detection).	Техническую эффективность интегрированной системы

ТАБЛИЦА 2. Глобальный контекст против Российской специфики – сравнительный анализ

Параметр	Глобальные тренды (США, ЕС, Китай, Южная Корея)	Положение в России	Анализ и соотношение
Драйверы развития	Коммерческая конкуренция, стандартизация (3GPP для SON, AI), массовый спрос, господдержка (напр., китайский план «Made in China 2025») [12].	Импортозамещение и технологический суверенитет, госзаказ (нацпроекты), триады в условиях санкционных ограничений [13]	Оптимизация и создание новых рынков, в России обеспечение базовой технологической независимости и безопасности
Уровень конвергенции	Высокий. Тесная интеграция вендоров (Cisco, Ericsson, NVIDIA), облачных провайдеров (AWS IoT, Azure AI) и вертикальных решений. Активное развитие AI-native сетей [14].	Сильные изолированные компетенции (математическая школа в AI, нишевые IoT-решения в промышленном секторе, разработки в области связи). Глубокая интеграция на уровне единичных пилотных проектов (часто при господдержке) [15]	Россия находится на ранней стадии формирования экосистемы, в то время как глобальные лидеры переходят к фазе масштабирования и отраслевой стандартизации интегрированных решений

Параметр	Глобальные тренды (США, ЕС, Китай, Южная Корея)	Положение в России	Анализ и соотношение
Ключевые барьеры	Проблемы безопасности и приватности, фрагментация стандартов IoT, высокая стоимость развертывания	Зависимость от иностранного оборудования для сетей связи (SON), ограниченный доступ к передовым чипам для AI. Недостаток крупных горизонтальных платформ, слабая связь между академическими разработками (AI) и промышленным внедрением (IoT, SON) [2, 13]	Глобальные барьеры – регуляторно-экономические, российские – структурно-технологические, связанные с изоляцией от глобальных цепочек создания стоимости
Перспективные ниши	Автономный транспорт, прецизионное земледелие, персонализированная медицина, метавселенные.	Промышленный IoT (Индустрия 4.0) в ВПК, энергетике, добывающей промышленности. Умные города с фокусом на ЖКХ и безопасность. Связь в удаленных районах (спутниковый IoT + AI-аналитика) [16]	Россия может использовать паттерн «распределенного интеллекта на границе» для развития в сегментах, критичных к суверенитету и имеющих внутренний спрос, минуя этап построения глобальных облачных экосистем

Паттерны конвергенции AI, SON и IoT носят универсальный характер и направлены на создание автономных, адаптивных и контекстно-зависимых киберфизических систем. Ключевой объединяющий паттерн – «цифровой контур с обратной связью», где каждая технология выполняет строго определенную роль в цикле «восприятие-анализ-действие» [5, 7].

Измерение прогресса требует многомерных метрик, оценивающих не только технологическую развитость компонентов, но и глубину их интеграции, экономический эффект и производительность итоговой системы [11].

Мировая динамика показывает движение к глубокой, «бесшовной» интеграции триады, движимое коммерцией и стандартизацией [12, 14]. Россия развивается в логике технологического суверенитета, что формирует уникальную траекторию: опора на внутренний спрос в стратегических отраслях (ВПК, ТЭК), развитие Edge-архитектур и акцент на специализированные, а не массовые IoT-решения [13, 16].

Основной вызов для России – преодолеть «силосный» эффект между сильными академическими школами AI, развивающимся IoT-сектором и телеком-индустрией, испытывающей давление санкций [2]. Успех будет зави-

сеть от создания открытых кросс-отраслевых платформ и стандартов, стимулирующих появление интегрированных решений «под ключ».

Направления будущих исследований в контексте данной статьи – это разработка отраслевых эталонных архитектур (референсных моделей) конвергенции для ключевых секторов экономики РФ, а также более детальный анализ метрик безопасности (Security-by-Design) в рамках исследуемой триады технологий.

Список используемых источников

1. McKinsey Global Institute. The Internet of Things: Catching up to an accelerating opportunity. 2023. URL: <https://www.mckinsey.com/mgi/our-research/the-internet-of-things-catching-up-to-an-accelerating-opportunity> (дата обращения: 15.10.2023).
2. Цифровая экономика. Национальный доклад «Искусственный интеллект в России: состояние и перспективы». М.: АНО «Цифровая экономика», 2022. 98 с.
3. Gubbi J., Buyya R., Marusic S., Palaniswami M. Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions // *Future Generation Computer Systems*. 2013. Vol. 29, № 7. P. 1645–1660.
4. 3GPP. Technical Specification Group Services and System Aspects; Release 18 Description; Summary of Rel-18 Work Items (TR 21.101). 2023.
5. Dörner R., Görlich P., Lorenz M. Feedback Loops in Cyber-Physical Systems // *Proceedings of the 2020 ACM SIGSIM Conference on Principles of Advanced Discrete Simulation*. 2020. P. 175–178.
6. Калашников В.В., Петров А.А. Интеллектуальные энергетические системы с элементами Интернета вещей // *Автоматика и телемеханика*. 2021. № 5. С. 78–95.
7. Moysen J., Giupponi L. From 4G to 5G: Self-organized network management meets machine learning // *Computer Communications*. 2018. Vol. 129. P. 248–268.
8. Open Networking Foundation. Intent-Based Networking – Definition and Principles. ONF TR-523, 2020.
9. Zhou Z., Chen X., Li E., Zeng L., Luo K., Zhang J. Edge Intelligence: Paving the Last Mile of Artificial Intelligence with Edge Computing // *Proceedings of the IEEE*. 2019. Vol. 107, № 8. P. 1738–1762.
10. ETSI. Multi-access Edge Computing (MEC); Framework and Reference Architecture. ETSI GS MEC 003, V3.1.1, 2022.
11. ITU-T. Assessment framework for Internet of Things (IoT) and smart cities and communities. ITU-T Y.4906, 2022.
12. World Economic Forum. Harnessing the Fourth Industrial Revolution for Sustainable Emerging Cities. 2023. URL: <https://www.weforum.org/reports/harnessing-the-fourth-industrial-revolution-for-sustainable-emerging-cities/> (дата обращения: 15.10.2025).
13. Стратегия развития отрасли информационных технологий в Российской Федерации на 2024–2030 годы. Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 22 ноября 2023 г. № 3216-п.
14. Nokia. AI in Mobile Networks: From Theory to Practice. Nokia Bell Labs white paper, 2023.
15. Аналитический центр при Правительстве Российской Федерации. Мониторинг цифровой трансформации отраслей экономики и социальной сферы. Бюллетень № 4 (52), 2023.

16. Государственная корпорация «Роскосмос». Концепция развития спутниковой связи и вещания, включая системы персональной спутниковой связи, на период до 2035 года. М., 2021.

THE CONVERGENCE OF AI, SON, AND IOT TECHNOLOGIES: PATTERNS, METRICS, AND GLOBAL TRENDS WITH A FOCUS ON RUSSIA

Erofeyev A., Pantyukhin O.

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

The article explores the triad of key technologies in modern digital transformation: the internet of things (IoT), artificial intelligence (AI), and self-organizing networks (SON). The purpose of the study is to identify systemic patterns of their convergence, propose metrics for measuring the level of their integration, and conduct a comparative analysis of the state and dynamics of this triad's development on a global scale and in the Russian Federation. It has been established that the driving pattern is the creation of «digital feedback loops», where IoT acts as the sensory and executive system, SON as the autonomous network nervous system, and AI as the cognitive control center. Russia demonstrates strong competencies in isolated segments (theoretical AI, specific IoT), but lags in mass commercialization and the creation of comprehensive cross-industry ecosystems characteristic of global leaders.

Key words: artificial intelligence, AI, Self-Organizing Networks, SON, Internet of Things, IoT, technology convergence, digital transformation, Industry 4.0, smart networks

УДК 004.8:621.39

ГРНТИ 50.47.35, 20.17.15

ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ В ЭПОХУ РАЗВИТИЯ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

А. Д. Ерофеев, О. И. Пантюхин

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Статья посвящена развитию и применению технологий искусственного интеллекта в телекоммуникационной отрасли. Рассматривается вклад искусственного интеллекта в развитие сетей связи и ключевые задачи, решаемые в области телекоммуникаций. Приводятся показатели вовлечение пользователей, финансовые вложения и прибыльность технологии искусственного интеллекта. Законодательное регулирование сферы искусственного интеллекта. Отдельное внимание уделено вопросам рисков и ограничений, связанным с применением искусственного интеллекта. Приведены цитаты Дарио Амодеи и Джеффри Хинтона о применении искусственного интеллекта их замечания и опасения.

искусственный интеллект, телекоммуникации, безопасность, регулирование, предиктивная аналитика

Искусственный интеллект (ИИ) – это развивающаяся прогрессивная технология, сложный инженерный инструмент, который уже повсеместно внедряется в разные сферы жизнедеятельности, но при этом до сих пор ведутся очень оживленные дискуссии о том, что же это, как это может навредить и что это может дать и сопоставим ли риск с пользой.

В настоящее время есть ряд особенностей, возникающих при использовании ИИ:

- «галлюцинации» – побочный эффект, обусловленный задачей дать ответ в любом случае без должной верификации поступающих данных;
- «гниение» – обусловленное обучением искусственного интеллекта на некорректных данных, после чего он не может вернуться к первоначальному обучению на корректных данных;
- искусственный интеллект может прибегнуть к защите своей целостности и помешать человеку его удалению (это было выявлено в ходе эксперимента, проведенного Anthropic, ИИ прибег к шантажу после того, как получил информацию о своем удалении);

– за искусственным интеллектом нужен «постоянный присмотр», чтобы отслеживать методы и приемы противоправного использования и мониторинг работы для корректировки весов с учетом поступающих данных для дальнейшего получения релевантной информации и (или) принятию корректных решений.

Сама по себе технология не новая, но именно с развитием вычислительных мощностей устройств, повышением пропускной способности телекоммуникаций и растущим пользовательским опытом, эта технология вышла на новый виток развития, появились большие языковые модели и нейросети с обратным распространением ошибки.

Эта технология, вобравшая в себя модели машинного обучения и нейросети, возымела в обществе сетевой эффект и лавинообразное внедрение в бизнес, науку, медицину и повседневную жизнь.

Цифровая трансформация в России вышла на новый этап: фокус сместился с базовой автоматизации на внедрение интеллектуальных систем. Почти 40 % организаций уже используют ИИ-агентов и ассистентов для решения бизнес-задач. Такие данные были представлены на отраслевой конференции по процессной аналитике, где обсуждались ключевые тренды 2025 года [1].

Чуть менее половины опрошенных россиян – 48 % – используют искусственный интеллект в своей жизни. Чаще всего нейронные сети используют для работы 20 % и для учебы 18 %. Не доверяют цифровому разуму 43 %, доверяют – 45 %. Наиболее массовые пользователи – молодые люди от 18 до 24 лет, лишь около половины из них готовы объяснить, что такое искусственный интеллект [2].

Важность и необходимость внедрение и совершенствование этой технологии в сфере телекоммуникаций обусловлена ростом и сложностью вычислений, скоростью обработки результатов вычислений и принятию решений по результатам вычислений в программно-аппаратном комплексе для оптимизации пропускной способности физических линий связи и осуществлению предиктивной функции основываясь на исторических данных и получаемых данных в настоящий момент время.

С развитием искусственного интеллекта в сетях пятого поколения будут создаваться виртуальные сети на одной физической инфраструктуре, в сетях шестого поколения появится когерентность и сценарный подход к предоставлению трафика, а метавселенная будет представлять иммерсивное онлайн-пространство. Точно в современных условиях трудно предска-

зять, как будет развиваться ИИ в сфере телекоммуникаций, но точно будет, как и сама сфера телекоммуникаций, которая в последствии займет ключевую роль в переходе к «Индустрии 4.0».

В 2024 году мировой рынок искусственного интеллекта в телекоммуникациях оценивался в 2,7 млрд долларов США и, по прогнозам, будет расти в среднем на 32,6 % в период с 2025 по 2034 год. Факторы роста: растущее внедрение ИИ для автоматизации сетей и обслуживания клиентов, интеграция искусственного интеллекта с технологией 5G, растущий спрос на предиктивную аналитику в телекоме, расширение решений кибербезопасности на основе искусственного интеллекта [3].

Использование искусственного интеллекта в России в сфере телекоммуникаций перестало быть экспериментом и стало неотъемлемой частью бизнес-процессов. По оценкам аналитиков, внедрение ИИ способно повысить EBITDA телеком-компаний на 3-4 процентных пункта уже через два года и на 8-10 пунктов – в течение пяти лет. Это превращает инвестиции в ИИ из имиджевого шага в стратегический инструмент роста [4].

Применение ИИ в сфере телекоммуникаций регулируется в России: Указом Президента РФ от 10 октября 2019 г. N 490 «О развитии искусственного интеллекта в Российской Федерации», Федеральным законом от 31.07.2020 N 258-ФЗ «Об экспериментальных правовых режимах в сфере цифровых и технологических инноваций в Российской Федерации» и Кодексом этики в сфере искусственного интеллекта (от 26 октября 2021 г.), который заложил основу для саморегулирования ИТ-отрасли в этом направлении.

Приведем ряд цитат нескольких ведущих специалистов в области ИИ, таких как Дарио Амоди – американского биофизика и специалиста по ИИ, генерального директора и соучредителя компании Anthropic – разработчика чат-бота Claude, и Джеффри Хинтона – британского и канадского ученого, внесшего заметный вклад в глубокое обучение. Его работы легли в основу современных систем ИИ от голосовых помощников до систем компьютерного зрения, от рекомендательных алгоритмов до генеративных нейросетей.

1. «Мы понимаем под упорядочиванием – создание моделей, которые полезны, честны и безвредны» [5].

2. «Мы считаем, что по мере роста возможности моделей, необходимы управление и координация по оценкам безопасности до широкого развертывания» [6].

3. «Открывать веса без мер безопасности – безрассудно, нужно в первую очередь проводить проверки безопасности и обеспечивать контролируемый доступ» [7].

4. «Системы искусственного интеллекта могут представлять системные риски, которые выходят за рамки индивидуального вреда – нам необходимы оценки перед развертыванием и постоянный мониторинг» [8].

5. «Я думаю, нам стоит довольно беспокоиться об этом. Я не считаю, что нам следует полагать, что все будет в порядке» [9].

6. «Больше всего меня беспокоит потеря контроля над системами ИИ по мере их роста в компетентности» [10].

Телекоммуникации в эпоху развития искусственного интеллекта активно внедряют и используют ИИ. Можно сделать следующие выводы – развитие телекоммуникаций зависит от развития ИИ, применение ИИ в телекоммуникациях экономически целесообразно, не у всех пользователей есть понимание технологии ИИ, законодательно сфера ИИ регулируется, ведущие специалисты в области ИИ смотрят на эту технологию, точнее на ее практическую реализацию с осторожностью и опаской. Это значит, что несмотря на активную разработку ИИ нужно быть предельно осторожным при внедрении этой технологии в телекоммуникации, особенно в качестве ядра сети, так как сбой ИИ может обернуться коллапсом.

Список используемых источников

1. ИИ становится массовым инструментом в российском бизнесе: его используют 39 % компаний // Информационный портал newsler.ru. URL: <https://www.newsler.ru/hitech/2026/01/29/ii-stanovitsya-massovym-instrumentom-v-rossijskom-biznese-ego-ispolzuyut-39-kompanij> (дата обращения: 10.03.2026).

2. Денисенко А. Половина россиян не доверяет ИИ, и половина использует его в повседневной жизни // Сетевое издание «CNews» («Синьюс»). URL: https://www.cnews.ru/news/top/2025-11-17_48_rossiyan_ispolzuyut_ii (дата обращения: 10.03.2026).

3. Размер рынка ИИ в телекоммуникациях – по компонентам, по модели развертывания, по технологиям, по применению, прогноз роста, 2025–2034 гг. URL: <https://www.gminsights.com/ru/industry-analysis/ai-in-telecommunication-market> (дата обращения: 10.03.2026).

4. Семенов Е. Внедрение ИИ повышает эффективность бизнеса телеком-операторов // Интернет-портал «Российской газеты» URL: https://rg.ru/2025/11/20/podkliuchili-svazi.html?utm_referrer=https%3A%2F%2Fyandex.ru%2F (дата обращения: 10.03.2026).

5. Anthropic. Constitutional AI: paper Anthropic. URL: <https://www.anthropic.com/papers/constitutional-ai> (дата обращения: 10.03.2026).

6. Anthropic. News / Anthropic. URL: <https://www.anthropic.com/news> (дата обращения: 10.03.2026).

7. Anthropic. Papers / Anthropic. URL: <https://www.anthropic.com/papers> (дата обращения: 10.03.2026).

8. Reuters. AI – open science or risk. Reuters. URL: <https://www.reuters.com/technology/ai-open-science-or-risk-2023> (дата обращения: 10.03.2026).

BBC News. Technology – репортаж об ИИ / BBC. URL: <https://www.bbc.com/news/technology-62732814> (дата обращения: 10.03.2026).

The Guardian. Geoffrey Hinton interview / The Guardian. URL: <https://www.theguardian.com/technology/2023/jun/02/geoffrey-hinton-ai-warning-interview> (дата обращения: 10.03.2026).

TELECOMMUNICATIONS IN THE ERA OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE DEVELOPMENT

Erofeyev A., Pantyukhin O.

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

The article is devoted to the development and application of artificial intelligence technologies in the telecommunications industry. It examines the contribution of artificial intelligence to the development of communication networks and the key tasks solved in the field of telecommunications. Indicators of user engagement, financial investments, and the profitability of artificial intelligence technology are provided. The legislative regulation of the artificial intelligence sphere is discussed. Special attention is paid to the issues of risks and limitations associated with the use of artificial intelligence. Quotes from Dario Amodei and Geoffrey Hinton regarding the application of artificial intelligence, their remarks and concerns, are presented.

Key words: artificial intelligence, telecommunications, security, regulation, predictive analytics

УДК 004.932.4

ГРНТИ 49.40.37

ИНТЕГРАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ КЕЙСОВ В УЧЕБНЫЙ ПРОЦЕСС ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ КОМПЕТЕНЦИЙ В ИНЖЕНЕРНОМ И ГОРНОТЕХНИЧЕСКОМ ОБРАЗОВАНИИ

Е. В. Зайцева

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II

В данной работе рассмотрены особенности интеграции производственных кейсов в изучение дисциплины «Введение в информационные технологии». Приведены примеры таких задач, полученных у компаний ООО НПФ «Гранч» и ООО «Арго и К». Рассмотрены основные способы решения задач, получаемые результаты, навыки, используемые студентами при выполнении заданий.

профессиональные компетенции, цифровые технологии, горнотехническое направление, цифровая обработка, производственные задачи

В Санкт-Петербургском горном университете императрицы Екатерины II в рамках пилотного проекта «Совершенствование системы высшего образования» сформировано «Ядро» высшего инженерного образования. Одной из дисциплин «Ядра» является «Введение в информационные технологии». Дисциплина изучается два семестра на 1-м курсе. Следует понимать, что студенты, приступающие к изучению дисциплины, впервые оказываются в вузовской среде и появляется возможность сразу сформировать необходимое отношение и требование к предмету, показать связь дисциплины со специальностью студентов. Для этого, помимо изучения терминов и основных понятий дисциплины, следует уделять внимание решению производственных задач, используя те знания, которые даются на лекциях и практиках.

Для правильной постановки подобного рода задач важно поддерживать связь кафедры и реального производственного, инженерного и горнотехнического секторов. Примером таких контактов может служить взаимодействие кафедры информатики и компьютерных технологий с компаниями ООО НПФ «Гранч» и ООО «Арго и К». Компания «Гранч» занимается производством систем безопасности для шахт и горных выработок. Одной из ее разработок является Многофункциональная система связи, оповещения,

наблюдения и поиска людей, застигнутых аварией «SBGPS». В рамках работы системы осуществляется видеонаблюдение встроенными в головной светильник шахтера камерами, камерами взрывозащищенного смартфона и стационарными камерами в шахтах. ООО НПФ «Гранч» предоставляет кафедре видеоматериалы, полученные на испытаниях системы в шахтах. Компания «Арго и К» занимается развитием технологий глубинных телевидеоинспекций скважин. С 1995 года работы компании собран огромный банк видеоданных для работы.

Студенты в рамках курса «Введение в информационные технологии» получают задание по теме «Средства графического отображения пакета Matlab», в котором входными данными являются видеопоследовательности из шахт и скважин. Видеопоследовательности в шахтах получены в достаточно сложных условиях наблюдения: малые уровни освещения, высокая запыленность, туман, повышенная влажность, малое расстояние от объектива до объекта съемки, наличие засвеченных кадров при видеосъемке источника света. Видеоданные из нефтяных и газовых скважин также имеют свою специфику: единственным источником света является собственный подсвет телевизионной системы, малое расстояние до объекта съемки, наличие тумана. Таким образом формируется достаточно большой банк заданий для цифровой обработки. Каждый студент получает свою индивидуальную задачу. Приведем примеры таких заданий:

- повышение контрастности исходного видеофайла;
- устранение размытия исходного видеофайла;
- устранение импульсного шума исходного видеофайла;
- устранение шума Гаусса в исходном видеофайле;
- повышение резкости исходного видеофайла.

Уже на этом этапе студент первого курса понимает, что перед ним стоит задача из его профессиональной области, что исходные данные были получены в реальных условиях на существующем предприятии и действующем оборудовании. Для решения поставленной задачи студенту требуется применить следующие навыки и умения:

- чтения и записи видеоданных;
- преобразования цветовых моделей;
- работа с трехмерными матрицами;
- геометрические преобразования видеокадра;
- амплитудные преобразований в матрице;
- использование функций анализа изображений;

– использование функций фильтрации видеокадров.

Применяя вышеперечисленные навыки на практике, студент понимает, что все необходимые знания для решения задачи у него есть, что есть материал, изученный на курсе полезен. Это мотивирует студента к дальнейшей хорошей учебе. Помимо изучения информационных технологий, обучающиеся понимают, что им необходимы навыки также и математики

Также, можно изначально выдать студентам видеопоследовательности, и они сами должны определить, какую именно задачу будут решать. При этом в видеопоследовательности может быть сразу несколько задач для обработки:

- видеокадры могут быть засвеченными на отдельных участках и затемненными на других;
- на затемненных видеокадрах встречаются участки с импульсными шумами
- на затемненных видеокадрах проявляется эффект размытия.

Студент должен выявить все проблемы, обозначить метод решения и получить результаты. Немаловажной задачей становится оценка полученного результата. Мало получить хорошее визуальное качество – этот показатель достаточно субъективен. Важно оценить это визуальное качество количественно. На этом этапе обучающийся знакомится с таким понятием как эталонные и неэталонные методы, понимает, что в реальных условиях невозможно получить идеальный видеокадр. При расчете количественных характеристик качества потребуется знание средних величин арифметических и геометрических, а также градиентных методов.

В качестве примера приведем особенности расчета количественных характеристик качества для видеокадра фильтра забая:

1. Средний уровень яркости считается как среднее арифметическое всех пикселей изображения по трем каналам RGB.

2. Для оценки коррекции размытости используется метод Tenengrad – градиентный метод, основанный на оценке среднего квадрата градиента яркости пикселей монохромного изображения.

Увеличение Tenengrad означает более четкие границы и является мерой уменьшения размытия. В случае цветного изображения расчеты следует проводить так же по трем каналам RGB. Пример результатов расчета приведен в таблице 1.

ТАБЛИЦА 1. Результаты расчета количественных характеристик

Изображение	Средний уровень яркости (K)	Tenengrad
Исходное	80,4712	113,9389
ClipLimit 1/K	89,1120	146,8291
ClipLimit 2/K	98,7039	151,1651
ClipLimit 1/(2*K)	80,6987	139,5592
Uniform	106,4453	151,3923
Rayleigh	104,4863	148,0864
Exponential	98,7039	151,1651
NumTiles [4 5]	99,5707	146,2241
NumTiles [8 10]	98,2405	151,9673
NumTiles [12 15]	97,4026	154,3475
NumTiles [16 20]	96,7734	155,6359
NumTiles [24 30]	96,6104	157,3361

При получении хороших практических результатов, выверенных работающих алгоритмов студенту можно рекомендовать участвовать в программе «Ассистент ученого» для продолжения работ и совершенствования результатов. Два студента, получившие такую рекомендацию, под руководство доцента кафедры далее опубликовали материалы докладов и приняли участие в конференциях [1–3].

В работе показано использование одного типа задач для формирования и закрепления у студентов профессиональных навыков. Информационные и цифровые технологии применяются для решения более широкого спектра задач. Демонстрируя такое применение цифровых методов, возможно повышать исследовательский интерес и успеваемость, а далее привлекать студентов к научным мероприятиям.

Список используемых источников

1. Арефьева Е. И. Исследование методов адаптивного выравнивания гистограммы к видеоинформации, полученной в глубинных скважинах // Молодежь. Техника. Космос. Труды XVII международной Молодежной научно-технической конференции, приуроченной к 150-летию со дня основания Ремесленного училища цесаревича Николая. В 4-х томах. Санкт-Петербург, 2025. С. 130-133. EDN: LFEOWT.

2. Зайцева, Е. В. Исследование методов цифровой обработки видеок кадров, полученных в глубинных скважинах / Е. В. Зайцева, А. В. Яковлев // Метрологическое обеспечение инновационных технологий: Сборник статей VII Международного форума,

Санкт-Петербург, 04 марта 2025 года. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2025. С. 163-164. EDN: WNDODN.

3. Яковлев А. В. Применение методов цифровой обработки изображений для повышения качества видеоисследований на примере нефтегазовых скважин // Молодежь. Техника. Космос. Труды XVII международной Молодежной научно-технической конференции, приуроченной к 150-летию со дня основания Ремесленного училища цесаревича Николая. В 4-х томах. Санкт-Петербург, 2025. С. 133-138. EDN: ATFDIQ.

INTEGRATION OF INDUSTRIAL CASES INTO THE EDUCATIONAL PROCESS TO DEVELOP PROFESSIONAL COMPETENCIES IN ENGINEERING AND MINING EDUCATION

Zaytseva E.

Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University

This article examines the integration of industrial case studies into the Introduction to Information Technology course. Examples of such problems, obtained from Granch NPF LLC and Argo i K LLC, are provided. The paper discusses the main problem-solving methods, the results obtained, and the skills used by students in completing the assignments.

Key words: professional competencies, digital technologies, mining engineering, digital processing, production tasks

УДК 004.932.4
ГРНТИ 49.40.37

ПРИМЕНЕНИЕ ИНТЕРПОЛЯЦИИ КУБИЧЕСКИМИ СПЛАЙНАМИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ВИДЕОКАМЕР, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В НЕФТЯНЫХ И ГАЗОВЫХ СКВАЖИНАХ

Е. В. Зайцева, В. М. Состина

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II

В статье рассматривается задача оптимизации внутрискважинного видеокаротажа за счет подбора оптимальной температуры подсвета. Предложена методика расчета коэффициентов использования излучения матричным приемником на основе интерполяции спектральной характеристики камеры кубическими сплайнами.

внутрискважинный видеокартаж, цветовая температура, кубические сплайны, диагностика скважин

Внутрискважинный видеокартаж (или скважинная телеинспекция) – это вид геофизических исследований, который позволяет получить изображение внутренней поверхности скважин в реальном времени [1–3]. Применение скважинной телеинспекции позволяет выявить дефекты конструкции, например разрыв насосно-компрессорных труб, отсутствующие фрагменты обсадной колонны, посторонние предметы в скважине и т.д. Получение четкого контрастного изображения непосредственно влияет на качество диагностики [4], по результатам которой будут предприняты меры по ликвидации дефектов. Критически важным является правильно интерпретировать полученные изображения,

В настоящее время процесс внутрискважинного видеокаротажа оптимизирован не в полной мере. Для съемки используется подсвет произвольной цветовой температуры, тогда как именно этот показатель больше всего влияет на коэффициент использования излучения и, в последствии, на качество полученного изображения. Если же и подбирается наиболее оптимальная цветовая температура подсвета, то это происходит с применением численных методов (метод трапеции для вычисления интеграла), что приводит к длительным расчетам с высокой вероятностью погрешности.

Для определения коэффициента использования излучения был проанализирована информация о квантовой эффективности камеры глубинной телевизионной видеосистемы в зависимости от длины падающего света. Из графика зависимости было выделено 33 точки с шагом 25 нм (рис.1).

Для определения интерполирующей функции использовались кубические сплайны. Такой способ интерполяции предпочтительнее обычной полиномиальной, так как помогает избежать появления «скачков» функции. Кроме того, при наличии погрешности в измерениях некоторых конкретных точек полиномиальная интерполяция воспримет эти ошибки как важную особенность массива данных, в то время как сплайн обойдет их локально. Каждая функция должна быть третьей степени, а ее третья производная непрерывна на всем интервале.

Для определения коэффициента излучения необходимо вычислить относительную спектральную плотность светимости АЧТ $X(\lambda, T)$, которая рассчитывается по формуле [3]:

$$X(\lambda, T) = \frac{2,9081 \cdot 10^{19}}{(\lambda T)^5} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{14388}{\lambda T}\right) - 1},$$

где λ – длина волны излучения, нм;

T – температура АЧТ, К.

Коэффициент использования излучения источника матричным приемником K определяется соотношением [3]:

$$K = \frac{\int_0^\infty X(\lambda, T) \cdot S(\lambda) d\lambda}{\int_0^\infty X(\lambda, T) d\lambda},$$

где $S(\lambda)$ – относительная спектральная чувствительность матрицы.

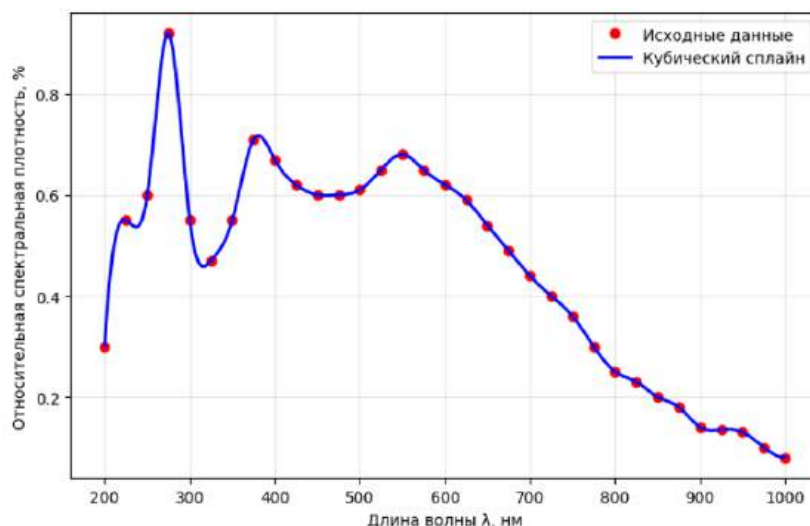


Рис. 1. Интерполяция кубическими сплайнами функции относительной спектральной плотности

Так как на каждом интервале заданы разные кубические функции, в числителе выражения была вычислена сумма определенных интегралов, пределы которого совпадают с начальной и конечной точками интервалов. Таким образом, были рассчитаны коэффициенты использования излучения матрицы для цветовых температур от 3200 К до 6000 К с шагом 100 К. В таблице 1 приведем результаты с шагом 500 К.

ТАБЛИЦА 1. Результаты вычислений коэффициентов использования излучения матрицы для цветовых температур от 3200 К до 6000 К с шагом 500 К

Цветовая температура, К	Коэффициент использования излучения, отн. ед.
3500	0,367981
4000	0,403512
4500	0,433794
5000	0,459377
5500	0,48089
6000	0,498931

В результате вычислений свет с цветовой температурой 6000°К имеет наибольший коэффициент использования матрицей, который составил 49,9 %.

Предложенная методика вычислений позволяет быстро производить подсчет оптимальной цветовой температуры для подсвета видеокамеры, что в дальнейшем может использоваться для оптимизации внутрискважинного видеокаротажа.

Список используемых источников

1. Опыт применения скважинных систем видеонаблюдения при проведении капитального ремонта скважин / Н.А. Исмаилов, А.А. Воркожаков // Территория «Нефтегаз». 2010. № 12. С. 14-17.
2. Скворцов В. Ю., Скворцов И. В., Савенок О. В. 3D моделирование в интерпретации результатов телевидеоинспекций скважин // В книге: БайкалГео"24. Сборник тезисов докладов научно-практической конференции. Москва, 2024. С. 125-130.
3. Опыт применения аппаратуры скважинного акустического сканера высокого разрешения совместно с видеокаротажом для исследований открытого ствола / В. Е. Косарев, Ю. С. Масленникова, А. Д. Акчурин [и др.] // Нефтяное хозяйство. 2013. № 6. С. 53-55. EDN QCNAMB.
4. Зайцева Е. В., Кочнева А. А., Катунцов Е. В. Оптимизация технологического процесса повышения контрастности на изображениях, полученных в шахтах // Горный ин-

формационно-аналитический бюллетень. 2025. № 7. С. 115–130. DOI: 10.25018/0236-1493-2025-7-0-115.

APPLICATION OF CUBIC SPLINE INTERPOLATION FOR ESTIMATING THE SENSITIVITY OF VIDEO CAMERAS USED IN OIL AND GAS WELLS

Zaytseva E., Sostina V.

Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University

Caching segment lasting a few minutes each TV program in the provision of services «Television, shifted in time» make it possible to meet a large part of the demand from customers, which makes it advisable to use the distributed proxy servers with limited resource capacity. Analytical model of service determines the ratio of requests processed by the server cache to the total number of requests.

Key words: downhole video logging, color temperature, cubic splines, well

УДК 535
ГРНТИ 49.37.31**МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ
ПРИРОДНЫЙ МОНИТОРИНГ****А. Ю. Игуменов^{1,2}, Р. М. Марков¹, И. В. Мельников¹, В. А. Соколов¹**¹Национальный исследовательский университет «МФТИ»² Научно-технический центр Т8

Рассматривается автономный комплекс мониторинга различных параметров почвы на основе волоконно-оптических датчиков. В проекте задействуются как традиционные волоконно-оптические температурные датчики на основе брэгговских решеток (ВБР), так и оригинальные ВБР-датчики влажности и количества атмосферных осадков. Опрос датчиков производится многоканальным интеррогатором, позволяющим пересчитывать сдвиг брэгговской волны не только в температуру, но и в другие параметры по заданным формулам. Датчики объединены в одно абонентское устройство, работающее круглый год автономно, сбор и обработка данных проводится дистанционно.

природный мониторинг, волоконно-оптические датчики, волоконно-оптические брэгговские решетки

Введение

Мониторинг природных параметров (температуры, осадков, солености и др.) необходим для понимания климатических процессов и оценки состояния экосистем. Традиционные электронные датчики имеют серьезные ограничения: чувствительность к электромагнитным помехам, коррозия в агрессивных средах и сложность масштабирования на больших территориях [1].

Волоконно-оптические датчики (ВОД) и распределенные системы на их основе предлагают более совершенный подход к экологическому мониторингу [1]. К основным преимуществам ВОД относится возможность их размещения на значительных расстояниях от источников электропитания, быстроедействие, разнообразный набор измеряемых физических величин, а также стойкость к перепадам температур, агрессивным средам и электромагнитным помехам [1-7]. Наиболее перспективными являются распределенные акустические и температурные датчики [8, 9], позволяющие проводить измерения в стандартном телекоммуникационном волокне.

Данная статья посвящена волоконно-оптической части разрабатываемого в МФТИ автономного многофункционального комплекса природного мониторинга. Комплекс представляет собой абонентское устройство, оснащенное экодатчиками и волоконно-оптическими датчиками, интегрированными в одну систему.

Архитектура и конструкция комплекса природного мониторинга

На рис. 1 представлена блок-схема комплекса природного мониторинга [10].



Рис. 1. Блок-схема комплекса природного мониторинга [10]

Комплекс снабжен встроенным аккумулятором, а в качестве источника электропитания используется комбинированная ветро-солнечная станция. Для опроса волоконно-оптических датчиков применяется 16-канальный интеррогатор, позволяющий проводить измерения с частотой до 2 кГц. В автономном режиме осуществляется сбор данных с датчиков разного типа о температуре, влажности и кислотности почвы. Отправка данных осуществляется по радиоканалу с модуляцией LoRa, позволяющая функционировать в рамках сети «Интернета вещей» (IoT). Разрабатываемый комплекс предполагает возможность работы с перспективными информационными сетями на базе космических аппаратов на низкой круговой околоземной орбите.

Волоконно-оптическая система мониторинга

Существенной особенностью разрабатываемого комплекса служит его оснащение системой волоконно-оптических датчиков (ВОД). В настоящем проекте реализуется волоконно-оптическая система мониторинга различных параметров, ключевые из которых — температура, влажность и количество атмосферных осадков.

Для системы распределенного мониторинга температуры почвы выбрано классическое решение, основанное на применении волоконных брэгговских решеток (ВБР). Принцип высокоточной регистрации параметров базируется на анализе сдвига спектральных характеристик оптического излучения. Основными преимуществами выступают: полная электромагнитная нечувствительность, антикоррозионные свойства и работоспособность в агрессивных средах. Возможность мультиплексирования датчиков на одном оптическом волокне обеспечивает эффективное построение распределенных измерительных сетей. Данная система позволяет проводить измерения температуры в широком диапазоне расстояний – от одного метра до пятидесяти километров. В качестве измерительного блока опроса ВБР используется 16-канальный интеррогатор (один интеррогатор способен опрашивать порядка 160 датчиков).

В качестве датчика влажности будет использована наклонная волоконная брэгговская решетка (НВБР). В таком датчике используется чувствительность оболочных мод к изменению показателя преломления окружающей среды. В отличие от классической ВБР, НВБР благодаря наклону плоскостей решетки возбуждает множество оболочных мод, поле которых проникает за пределы волокна. На поверхность волокна наносится влагочувствительный материал (например, полиимид), который при поглощении влаги меняет свой показатель преломления, вызывая сдвиг спектральных характеристик оболочных мод.

В данной работе предполагается разработка первого в России волоконно-оптического датчика количества атмосферных осадков. За основу взята статья [11]. На рисунке 2 приведена схема осадкомера и фотография его корпуса, изготовленного на 3D-принтере.

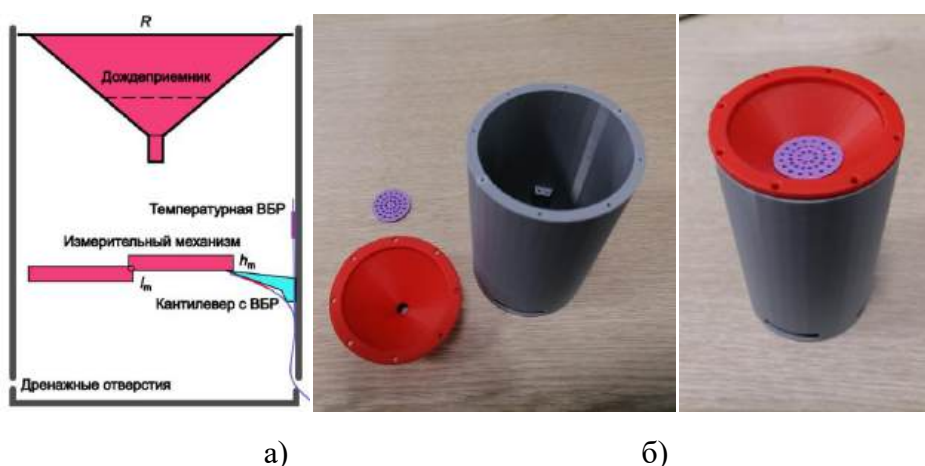


Рис. 2. Схема работы (а), и фото корпуса (б) ВБР-осадкомера

Предлагаемый осадкомер работает следующим образом. Осадки собираются в водосборный элемент, создавая силу тяжести $F = \rho \cdot P \cdot \pi \cdot R^2 \cdot g$. Эта сила изгибает консольную балку (кантилевер), на которую наклеена ВБР. Деформация балки вызывает сдвиг длины волны отраженного света. Зависимость между уровнем осадков P и сдвигом длины волны $\Delta\lambda_{BE}$ является линейной при фиксированных геометрических параметрах прибора. Формула, связывающая количество осадков P со сдвигом центральной длины волны $\Delta\lambda_{BE}$ ВБР:

$$\Delta\lambda_{BE} = \frac{4(1 - p_e)\lambda_B l}{Ebh^2} \cdot \rho\pi R^2 \cdot P,$$

где $\Delta\lambda_{BE}$ – сдвиг длины волны ВБР (измеряемая величина); P – уровень осадков (масса воды на единицу площади); ρ – плотность воды (1000 кг/м^3); R – радиус водосборного элемента; l , b , h – длина, ширина и высота консольной балки; E – модуль упругости материала балки; λ_B – начальная длина волны ВБР; p_e – коэффициент фотоупругости (теоретическое значение 0,22).

Основным преимуществом выбранной конструкции является ее способность работать непрерывно без ручного опорожнения. Весь процесс измерения разбит на повторяющиеся циклы «наполнение-опорожнение», вследствие чего график зависимости длины волны ВБР от времени представляет собой пилообразную кривую: рост, затем резкий сброс до исходного уровня, затем снова рост. Общее количество осадков вычисляется как сумма объемов воды, зафиксированных во всех полных циклах (каждый сброс соответствует заранее известному пороговому объему) и в последнем незавершенном цикле (измеряется по величине сдвига длины волны).

Заключение

Рассмотрен автономный комплекс мониторинга различных параметров почвы на основе волоконно-оптических датчиков. Мониторинг температуры осуществляется классической схемой, состоящей из интеррогатора и набора волоконных брэгговских решеток (ВБР). Для измерения влажности предполагается изготовление оригинальных датчиков на основе наклонных ВБР. Представлен прототип и принцип работы первого в России ВБР-осадкомера, способного работать непрерывно без сложностей с переполнением резервуара. Опрос датчиков производится многоканальным интеррогатором, позволяющим пересчитывать сдвиг брэгговской волны не только в температуру, но и в другие параметры по заданным формулам. Датчики

объединены в одно абонентское устройство, работающее круглый год автономно, и отправляющее данные по радиоканалу с модуляцией LoRa, позволяющая функционировать в рамках сети «Интернета вещей» (IoT).

Исследование выполнено при финансовой поддержке Фонда НТИ в рамках Договора №70-2025-000804 от 26.05.2025.

Список используемых источников

1. Butt M. A., Voronkov G. S., Grakhova E. P., Kutluyarov R. V., Kazanskiy N. L., Khonina S. N. Environmental Monitoring: A Comprehensive Review on Optical Waveguide and Fiber-Based Sensors // Biosensors. 2022. V. 12, 1038.
2. Guzmán-Sepúlveda J.R., Guzmán-Cabrera R., Castillo-Guzmán A.A. Optical sensing using fiber-optic multimode interference devices: a review of nonconventional sensing schemes // Sensors 2021. 21(5). P. 1862.
3. Wang K., Dong X., Köhler M.H., Kienle P., Bian Q., Jacobi M., Koch A.W. Advances in optical fiber sensors based on multimode interference (MMI): a review // IEEE Sensors journal 2021. 21(1). P. 132–142.
4. Lin W., Miao Y., Zhang H., Liu B., Liu Y., Song B. Fiber-optic in-line magnetic field sensor based on the magnetic fluid and multimode interference effects // Appl. Phys. Lett. 2013. 103. P. 151101.
5. Игуменов А. Ю., Боголюбова Е. В., Горбашова М. А., Чебыкин И. П. Оптические волокна: физические основы и практические применения: учебное пособие. М.: МФТИ, 2023. 76 с.
6. Игуменов А.Ю., Мельников И.В., Афанасьев А.А., Попова С.С., Лукиных С.Н., Тамбасов И.А. Рефлектометрическое измерение температуры с использованием оптоволоконной структуры «одномод-многомод-одномод» // ЖТФ. 2022. Т. 48, № 17. С. 17-19.
7. Игуменов А. Ю., Мусин Р. Д., Надеждин Е. Р., Мельников И. В., Ковалев А. Н., Голышев И. В., Дубиня Н. В. Датчик изгибных деформаций на основе волоконно-оптической SMS-структуры // Труды МФТИ. 2025. Т. 17, N 3. С. 159-170.
8. Бухарин М. А., Горбуленко В. В., Наний О. Е., Никитин С. П., Трещиков В. Н., Фомиряков Э. А., Харасов Д. Р. Когерентный Рэлеевский рефлектометр. Теперь и измерение температуры // Фотон-экспресс. 2019. 2(154). С. 14-19.
9. Дудин А. С., Игуменов А. Ю., Харасов Д. Р., Фомиряков Э. А., Никитин С. П., Наний О. Е., Трещиков В. Н. Увеличение дальности работы распределенного акустического датчика с использованием эрбиевого усилителя с удаленной накачкой // Первая миля. 2023. Вып. 5. С. 30-35. DOI: 10.22184/2070-8963.2023.114.6.30.35.
10. Игуменов А. Ю., Мельников И. В., Соколов В. А. Многофункциональный комплекс природного мониторинга // 66-я научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава, научных работников и аспирантов (НТК ППС 2026); сб. науч. ст. / Под. ред. А. В. Рабина; сост. А. А. Дзюбаненко, И. М. Татарникова. СПб.: СПбГУТ. 2026. С. 199-204.
11. Jia J., Zhao Y., Qi H., Liu J., Liu J. Design and realization of high precision FBG rain gauge // Optoelectronics Letters. 2015. V. 11, N 3, P. 229-232.

MULTIFUNCTIONAL FIBER-OPTIC ENVIRONMENTAL MONITORING

Igumenov A.^{1,2}, Markov R.¹, Melnikov I.¹, Sokolov V.¹

¹National Research Nuclear University MEPhI

²T8 Scientific and Technical Center

This paper presents an autonomous system for monitoring various soil parameters using fiber-optic sensors. The project utilizes both traditional fiber-optic temperature sensors based on Bragg gratings (FBGs) and original FBG sensors for humidity and precipitation. The sensors are interrogated by a multichannel interrogator, which converts Bragg wave shifts not only into temperature but also into other parameters using preset formulas. The sensors are integrated into a single subscriber unit, which operates autonomously year-round, and data collection and processing is performed remotely.

Key words: *environmental monitoring, fiber optic sensors, fiber optic Bragg gratings*

УДК 53.082

ГРНТИ 90.27.33

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ГАЗОВОЙ ЯЧЕЙКИ И СТАБИЛЬНОСТИ ЧАСТОТЫ РУБИДИЕВОГО СТАНДАРТА

Е. В. Исупова¹, Д. С. Проводин^{1, 2}

¹Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

В работе исследовано влияние нестабильности терморегулятора газовой ячейки квантового дискриминатора на метрологические характеристики рубидиевого стандарта частоты. Проведен анализ зависимости относительной погрешности частоты от изменения сопротивления температурного датчика. Установлена корреляция между температурным режимом газовой ячейки и стабильностью выходного сигнала. Определен коэффициент чувствительности выходной частоты порядка $2 \cdot 10^{-14}$ на 1 Ом. Полученные результаты могут быть использованы при разработке систем термостабилизации квантовых стандартов частоты.

рубидиевый стандарт частоты, квантовый дискриминатор, газовая ячейка, терморегулятор, термостабилизация, относительная погрешность частоты, ПИД-регулятор

Введение

Функционирование современных навигационных систем, каналов передачи данных и научно-исследовательского оборудования связано с необходимостью использования высокостабильных опорных генераторов частот. Эту задачу в большинстве случаев решают с помощью рубидиевых стандартов частоты. Данные устройства сочетают в себе высокую прецизионность выходного сигнала с малыми массогабаритными параметрами и высокой надежностью, что обусловило их широкое применение в спутниковой навигации, телекоммуникациях и измерительной технике [1-3].

Работа рубидиевого стандарта частоты основана на использовании квантовых переходов атомов рубидия, параметры которых чувствительны к внешним воздействиям, в том числе к температуре. Существенное влияние на стабильность выходной частоты оказывает температурный режим газовой ячейки квантового дискриминатора. Даже незначительные отклоне-

ния температуры могут приводить к изменению характеристик резонансного сигнала и ухудшению метрологических параметров стандарта.

Для поддержания требуемого температурного режима применяется система автоматического терморегулирования. Однако нестабильность работы терморегулятора способна вызывать дополнительные температурные флуктуации, влияющие на долговременную стабильность частоты. Целью работы является исследование влияния нестабильности терморегулятора газовой ячейки квантового дискриминатора на метрологические характеристики рубидиевого стандарта частоты, а также оценка степени взаимосвязи между изменением температурного режима газовой ячейки и стабильностью выходной частоты стандарта.

Принцип работы рубидиевого стандарта частоты

Рубидиевый стандарт частоты предназначен для формирования высокостабильного опорного сигнала на основе квантовых переходов атомов рубидия. Основными элементами устройства являются кварцевый генератор, синтезатор частоты, квантовый дискриминатор и система автоматической подстройки частоты.

Принцип работы стандарта основан на взаимодействии сверхвысокочастотного электромагнитного поля с атомами рубидия, находящимися в газовой ячейке. Свет от рубидиевой лампы проходит через газовую ячейку, содержащую пары рубидия и буферный газ. При совпадении частоты возбуждающего сигнала с частотой квантового перехода атомов рубидия происходит изменение интенсивности проходящего света, регистрируемое фотодетектором.

Частота квантового перехода для атомов рубидия-87 составляет $f_0 = 6,834682610$ ГГц. Полученный сигнал используется системой автоматической подстройки частоты (АПЧ), чтобы скорректировать частоту кварцевого генератора. В результате этого частота выходного сигнала и частота квантового перехода атомов рубидия синхронизируются. Это обеспечивает высокую стабильность стандарта частоты [2, 4, 5].

Говоря о метрологических характеристиках стандарта частоты, стоит поговорить о температуре газовой ячейки квантового дискриминатора – она влияет на точность работы рубидиевого стандарта частоты. Малейшее изменение температуры приводит к смещению резонансной частоты, которое может быть описано выражением:

$$\Delta f = K_T \cdot \Delta T,$$

где Δf – изменение частоты;

K_T – температурный коэффициент;

ΔT – изменение температуры газовой ячейки.

Колебания температуры приводят к изменению давления буферного газа и к изменению параметров резонансного сигнала. Эти факторы вызывают смещение выходной частоты. Чтобы минимизировать данное влияние или нейтрализовать его, применяется система терморегулирования, поддерживающая температуру газовой ячейки стабильной [6, 7].

Подверженность метрологических характеристик стандарта частоты влиянию температурных нестабильностей терморегулятора

Температурный режим газовой ячейки прямо определяет стабильность работы рубидиевого стандарта частоты. Для поддержания требуемого температурного режима используется система автоматического регулирования, обеспечивающая компенсацию внешних тепловых воздействий и внутренних тепловыделений.

Однако наличие шумов измерительного тракта, погрешностей датчика температуры и особенностей настройки ПИД-регулятора может приводить к возникновению колебаний температуры относительно заданного значения. В результате происходит изменение параметров квантового резонанса и смещение выходной частоты стандарта.

Для оценки влияния терморегулятора на метрологические характеристики рубидиевого стандарта частоты был проведен сравнительный анализ изменения температуры газовой ячейки (рис. 1) и относительной погрешности частоты (ОПЧ) выходного сигнала (рис. 2). Для этого проводилось намеренное изменение температуры стандарты вокруг рабочей точки на определенную величину. Поскольку сопротивление датчика однозначно связано с температурой газовой ячейки, его изменение характеризует качество работы системы термостабилизации.

Для выявления закономерностей проводилось несколько таких температурных циклов.

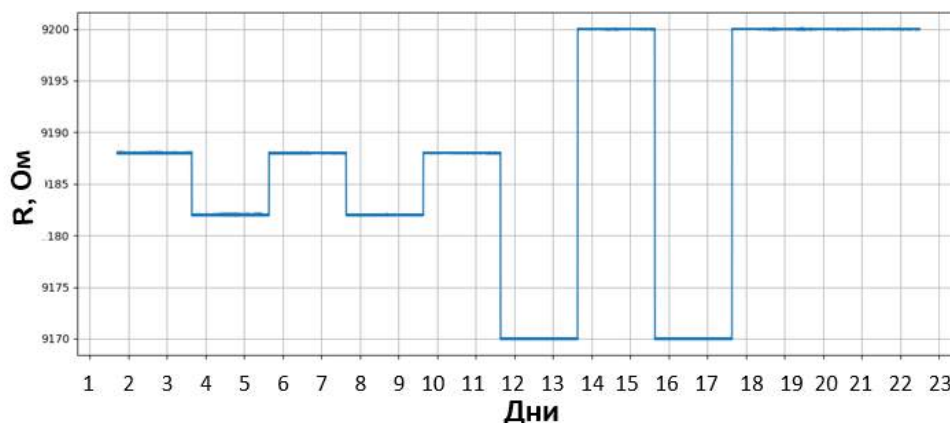


Рис. 1. Зависимость сопротивления термодатчика газовой ячейки дискриминатора от времени

Здесь приводится график изменения сопротивления и учитывается, что для NTC-термистор TP-2 с $R_0 = 33$ кОм формула пересчета выглядит следующим образом: $T = \frac{1}{\frac{1}{T_0} + \frac{1}{B} \ln \frac{R}{R_0}}$

где T – в Кельвинах;

R – текущее сопротивление;

R_0 – сопротивление в рабочей точке при $T_0 = 17,5$ °C;

B – коэффициент термодатчика.

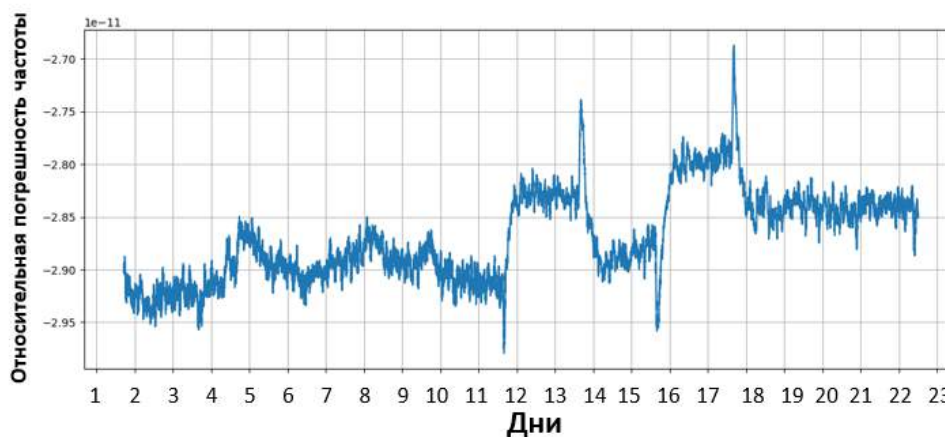


Рис. 2. График изменения частоты

Анализ всех вышеприведенных графиков показал наличие выраженной корреляции между изменением сопротивления датчика и значением ОПЧ. Также отмечается, что увеличение амплитуды температурных колебаний приводит к росту нестабильности выходной частоты и ухудшению метрологических характеристик стандарта. По полученным данным относительной погрешности частоты был вычислен статический коэффициент чувстви-

тельности стандарта к температуре газовой ячейки. Он составляет $2 \cdot 10^{-14}$ на 1 Ом.

Обобщая все результаты, можно прийти к выводу о том, что повышение точности поддержания температуры газовой ячейки действительно способствует снижению частотных флуктуаций и улучшению долговременной стабильности рубидиевого стандарта частоты. Следовательно, качество работы системы терморегулирования оказывает прямое влияние на характеристики устройства.

Заключение

В работе анализировалось влияние нестабильности терморегулятора газовой ячейки квантового дискриминатора на метрологические характеристики рубидиевого стандарта частоты. Было показано, что температурные колебания приводят к изменению параметров квантового резонанса. А также – к возникновению дополнительного ухода выходной частоты. Проведенное исследование подтверждает наличие прямой зависимости между качеством поддержания температурного режима газовой ячейки и стабильностью формируемого сигнала стандарта частоты.

Список используемых источников

1. Riley W.J. A History of the Rubidium Frequency Standard. IEEE Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control Society, 2019.
2. Lombardi M.A. Rubidium Oscillators // Encyclopedia of Physical Science and Technology. 3rd ed. San Diego: Academic Press, 2003. P. 357–372.
3. Lombardi M. A. The Evolution of Time Measurement, Part 2: Atomic Clocks // IEEE Instrumentation & Measurement Magazine. 2011. Vol. 14. N 6. P. 41–48.
4. Patil Y.S., Ramakumar P.S., Veluchamy S. Rubidium Frequency Standards // Atomic Frequency Standards. Cham: Springer, 2022. P. 661–686.
5. Ghosal B., Mandal S., Nandanwar S. et al. Demonstration of Design Verification Model of Rubidium Frequency Standard // arXiv preprint arXiv:1109.0277. 2011.
6. Vanier J., Audoin C. The Quantum Physics of Atomic Frequency Standards: in 2 vols. Bristol: Adam Hilger, 1989. 1332 p.
7. Camparo J.C. A Partial Analysis of Drift in the Rubidium Gas Cell Atomic Frequency Standard // Proceedings of the 18th Annual Precise Time and Time Interval Systems and Applications Meeting. 1986. P. 565–588.

Статья представлена научным руководителем, профессором кафедры ОКСС СПбГУТ, доктором физико-математических наук, профессором В. В. Давыдовым.

CORRELATION BETWEEN GAS CELL THERMAL REGIME AND FREQUENCY STABILITY OF A RUBIDIUM STANDARD

Isupova E.¹, Provodin D.^{1,2}

¹The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

²Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University

The work investigates the influence of the gas cell thermostat instability of a quantum discriminator on the metrological characteristics of a rubidium frequency standard. An analysis of the dependence of the relative frequency error on the change in resistance of the temperature sensor is carried out. A correlation between the temperature regime of the gas cell and the output signal stability is established. The sensitivity coefficient of the output frequency is determined to be on the order of $2 \cdot 10^{-14}$ per 1 Ohm. The obtained results can be used in the development of thermal stabilization systems for quantum frequency standards.

Key words: rubidium frequency standard, quantum discriminator, gas cell, thermostat, thermal stabilization, relative frequency error, PID controller

УДК 621.391:534.2

ГРНТИ 49.03.05

ЛИНЕЙНАЯ МОДЕЛЬ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КАНАЛА: УСЛОВИЯ И ОГРАНИЧЕНИЯ ПРИМЕНИМОСТИ

А. В. Качнов, Д. А. Перес-Кальдерон

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В работе рассматривается обоснование линейности канала передачи данных, основанного на передаче упругих волн ультразвукового диапазона в металлическом барьере. Проведен анализ волнового уравнения в линейном приближении теории упругости. Сформулированы и обоснованы условия, при которых среда может рассматриваться как линейный фильтр с постоянной импульсной характеристикой. Приводится оценка уровня нелинейных искажений. Показано, что отклонения от линейной модели могут быть обусловлены значением амплитуды возбуждения, температурной неоднородностью и неидеальностью акустического контакта. Доказано, что при выполнении этих условий канал может считаться линейным.

акустический трансформатор, линейная система, нелинейная акустика, структурно-неоднородный канал

Задача беспроводной передачи информации через сплошные металлические барьеры (корпуса химических реакторов, подводных аппаратов, герметичные контейнеры) существенно затруднена в условиях применения традиционных радиотехнологий из-за эффекта экранирования [1-2]. Рабочей альтернативой является использование упругих механических колебаний в толще металла, которые испытывают незначительное затухание при прохождении барьеров.

С точки зрения системы передачи, участок металлического барьера между пьезоэлектрическими преобразователями представляет собой канал передачи информации. Для анализа применимости различных видов модуляции и расчета пропускной способности по Шеннону необходимо обосновать тот факт, что рассматриваемый канал является линейным в математическом смысле.

В настоящей работе приводится обоснование применимости линейной модели к ультразвуковому каналу акустического трансформатора.

1. Модель канала в приближении линейной теории упругости

В рамках настоящей работы под входом ультразвукового канала будем понимать электрический сигнал $U_{\text{вх}}(t)$, который подается на передающий пьезопреобразователь, под выходом – электрический сигнал $U_{\text{вых}}(t)$, который формируется на электродах приемного пьезопреобразователя. Под линейностью канала будем понимать линейность отображения входного напряжения $U_{\text{вх}}(t)$ в выходное напряжение сигнала $U_{\text{вых}}(t)$.

Предположим, что $U_{\text{вх}}(t)$ таков, что пьезоэлектрический преобразователь вызывает малые деформации барьера. Также с учетом справедливости линейной теории упругости, уравнение распространения упругих волн в металлическом барьере [1] будет иметь вид:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - (\lambda + 2\mu) \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = F(x, t), \quad (1)$$

где ρ – плотность материала барьера; (λ, μ) – упругие постоянные Ламе, $u(x, t)$ – смещение вдоль оси x , $F(x, t)$ – внешняя воздействующая сила.

При взаимодействии пьезопреобразователей между границами барьера $x \in [0, L]$ предполагается, что внешняя сила равна нулю, это делает уравнение (1) линейным относительно функции смещения $u(x, t)$, следовательно суперпозиция решений (1) также будет являться решением этого уравнения.

Зависимость между входным электрическим сигналом и амплитудой механических колебаний на границе барьера также принимается линейной. В простейшем случае граничное условие на передающей стороне может быть выражено в виде:

$$u(0, t) = d_{33} \cdot U_{\text{вх}}(t), \quad (2)$$

где d_{33} – эффективный коэффициент электромеханического преобразования (м/В).

В связи с тем, что пьезоэффект является обратимым, выходной электрический сигнал приемного преобразователя в линейном приближении также будет пропорционален механическому смещению на противоположной стороне барьера. С учетом принятой линейной модели излучающего и принимающего преобразователя входной и выходной электрические сигналы линейно связаны через поле упругих смещений в барьере и могут быть описаны следующим образом:

$$U_{\text{вых}}(t) = K \cdot \varepsilon(L, t) = K \cdot \frac{du}{dx}(L, t), \quad (3)$$

где, $\varepsilon(x, t)$ – амплитуда деформации барьера на расстоянии x от плоскости передатчика в момент времени t , K – эффективный коэффициент преобразования механического отклика в выходной электрический сигнал, L – толщина барьера.

В общем случае коэффициент K зависит не только от параметров пьезокерамики, но и от геометрии преобразователя, электрической нагрузки, усилительного тракта и типа принимаемой механической величины (смещение, деформация, напряжение, скорость).

Пусть $u_1(x, t)$ является решением уравнения (1) с граничным условием (2), а выходной сигнал $U_{\text{вых1}}(t)$ описывается уравнением (3), аналогичные выражения справедливы для входного сигнала $u_2(x, t)$. Поскольку выражение (1) является линейным и однородным, то и сигнал вида $u(x, t) = u_1(x, t) + u_2(x, t)$, с учетом граничного условия (2) принимает вид:

$$u(0, t) = u_1(0, t) + u_2(0, t) = d_{33} \cdot [U_{\text{вх1}}(t) + U_{\text{вх2}}(t)] \quad (4)$$

Из (4) следует, что сигнал $u(x, t)$ представляет собой сумму двух отдельных независимых входных сигналов. Далее рассмотрим выражение (4) для входного сигнала $u(x, t)$:

$$U_{\text{вых}}(t) = K \cdot \left[\frac{du_1}{dx}(L, t) + \frac{du_2}{dx}(L, t) \right] = U_{\text{вых1}}(t) + U_{\text{вых2}}(t) \quad (5)$$

Уравнение (5) доказывает, что выходной сигнал представляет собой сумму двух независимых выходных сигналов, что доказывает линейность канала связи.

Инвариантность канала во времени следует из отсутствия явной зависимости от времени в уравнениях (1–3). Действительно, если функция $u(x, t)$ является решением задачи (1) для входного электрического сигнала $U_{\text{вх}}(t)$, то и функция $\tilde{u}(x, \tau) = u(x, t - t_0)$ является решением для входного сигнала $\tilde{U}_{\text{вх}}(\tau) = U_{\text{вх}}(t - t_0)$. Следовательно, и выходной сигнал также будет сдвинут по времени $\tilde{U}_{\text{вых}}(\tau) = U_{\text{вых}}(t - t_0)$. Таким образом при постоянстве параметров среды и преобразователей канал является инвариантным во времени.

Поскольку среда однородна по времени (параметры ρ , λ , μ не зависят от времени t), а уравнение (1) линейно, то реакция на произвольное воздействие может быть выражено через свертку с импульсной характеристикой канала $h(t)$:

$$U_{\text{вых}}(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(\tau) \cdot U_{\text{вх}}(t - \tau) d\tau \quad (6)$$

Наличие представления (6), а также экспериментальные данные предыдущих работ авторов (например, [2]) доказывают, что металлический барьер в рамках сделанных допущений является линейным фильтром с частотно-зависимым затуханием.

3. Физические ограничения линейности

Рассмотренный канал акустического трансформатора может считаться линейным только в первом приближении. Далее определим границы применимости линейной модели и рассмотрим основные факторы, приводящие к нелинейности.

В реальном металле связь напряжения σ и деформации ε содержит степенные члены, так называемый ангармонизм кристаллической решетки:

$$\sigma = E\varepsilon + \frac{1}{2}E_2\varepsilon^2 + \dots$$

Что приводит к возбуждению второй и высших гармоник при распространении упругой волны в толще барьера. Относительная амплитуда второй гармоники на расстоянии x может быть оценена как:

$$\frac{A_2}{A_1} \approx \beta \cdot \varepsilon \cdot k \cdot x \quad (7)$$

где β – параметр акустической нелинейности, k – волновое число, ε – амплитуда деформации.

Проведем численную оценку значения относительной амплитуды второй гармоники для реального случая по формуле (7). В качестве примера возьмем задачу передачи информации через корпус донной станции комплекса сейсмической разведки КРАБ [3,4]:

1. Рабочая частота пьезоизлучателя $f = 500$ кГц: $k = 2\pi f/c_{зв} \approx 532$ м⁻¹.
2. Параметры стали: $c_{зв} \approx 5900$ м/с, $\beta \approx 5$;
3. Толщина барьера $x = 30$ мм: $k \cdot x \approx 16$;
4. Пьезомодуль $d_{33} = 200 \cdot 10^{-12}$ м/В, напряжение на преобразователе $U = 10$ В, толщина пьезопреобразователя $l = 1$ мм.
5. Деформация: $\varepsilon = d_{33} \cdot (U/l) = 2 \cdot 10^{-6}$.
6. Тогда относительная амплитуда второй гармоники по (4) будет:

$$A_2/A_1 \approx \beta \cdot \varepsilon \cdot k \cdot x = 5 \cdot 2 \cdot 10^{-6} \cdot 16 = 1.6 \cdot 10^{-4} \quad (8)$$

Полученное в (8) значение означает, что вторая гармоника на четыре порядков слабее основного сигнала. Такое отношение в большинстве практических применений означает, что вторая гармоника по амплитуде находится за пределами чувствительности приемного устройства и ее значением можно пренебречь.

Также в рамках рассмотрения вопроса нелинейности, необходимо учесть влияние контактного соединения между пьезоэлектрическим преобразователем и барьером. В реальности и поверхность барьера, и поверхность излучателя имеют микронеровности. Такая граница, может выступать сама по себе как нелинейным элемент. Для сохранения линейности канала требуется обеспечения жесткого акустического контакта. На практике это означает что должно быть обеспечено давление порядка 1 МПа, конструктивно это достигается либо механическим прижимом, либо приклеиванием пьезоизлучателя к барьеру.

Стоит упомянуть еще одно условие, которое также оказывает существенное влияние на линейность канала. Температура барьера по толщине должна быть однородна или как минимум линейно изменяющаяся. Модули упругости материала $C_{ijkl}(T)$ снижаются с ростом температуры, это в свою очередь является причиной возникновения параметрической нелинейности канала – скорость звука в барьере становится функцией координаты и времени. Также, при высоких температурах (порядка 0.3...0.5 от температуры плавления) среда начинает вести себя как нелинейно-вязкая [5].

4. Заключение

В инженерных задачах обеспечения информационного обмена через металлические барьеры, ультразвуковой барьер может быть описан как линейный канал передачи, если одновременно выполняются следующие условия:

- амплитуды деформации металла не превышают области упругости материала ($\varepsilon < 10^{-5}$);
- температура барьера по толщине однородна или линейно изменяется;
- обеспечен жесткий акустический контакт пьезоизлучателя и барьера.

Нарушение любого из этих условий (например, неплотное прилегание пьезоизлучателей, использование сдвиговых волн) приводит к тому, что линейная модель перестает адекватно описывать процессы в ультразвуковом канале.

Строгое математическое доказательство линейности канала справедливо исключительно для идеализированной модели (среда однородна, идеальный контакт, выполнение закона Гука). Однако, для большинства инженерных приложений модель линейного фильтра является практически применимой и допустимой.

Список используемых источников

1. Викторов И. А. Физические основы применения ультразвуковых волн Рэлея и Лэмба в технике. Москва: Наука, 1966. 168 с.
2. Качнов А. В., Прасолов А. А., Туманова Е. И. Исследование характеристик канала акустического трансформатора с учетом многократных переотражений от границ барьера // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2025): сборник научных статей XIV Международной научно-технической и научно-методической конференции. В 2-х томах. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, 2025. С. 128–133.
3. Рогинский К. А. Сейсморазведка в транзитной зоне. Опытно-промышленные испытания системы «КРАБ-400» (этап 3) / К. А. Рогинский, Д. А. Ильинский, О. Ю. Ганжа // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2021. Т. 13. № 5. С. 611-624. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-5-611-624. EDN: URZHUE.
4. Качнов А. В., Кропанина А. А. Формирование требований к системе беспроводной передачи данных и электроэнергии сейсмических донных станций комплекса «КРАБ» // Подготовка профессиональных кадров в магистратуре в эпоху цифровой трансформации (ПКМ-2024): сборник лучших докладов V Всероссийской научно-технической и научно-методической конференции магистрантов и их руководителей. В 2-х томах. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, 2024. С. 159–163.
5. Семеренко Ю. А., Мозговой А. В., Скибина Л. В. и др. Акустические свойства новых сплавов Inconel 52 и Inconel 52MSS в интервале температур 77–1200 К // Металлофизика и новейшие технологии. 2015. Т. 37. № 12. С. 1643–1652.

Статья представлена научным руководителем, доцентом кафедры ЦТМ СПбГУТ, кандидатом технических наук Е. И. Тумановой

**LINEAR MODEL OF AN ULTRASONIC CHANNEL: APPLICABILITY
CONDITIONS AND LIMITATIONS**

Kachnov A., Perez-Calderon D.

The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

The paper studies the linearity of a data transmission channel based on the propagation of ultrasonic elastic waves in a metal barrier. An analysis of the wave equation is carried out within the linear approximation of the theory of elasticity. The conditions under which the medium can be considered a linear filter with a constant impulse response are formulated and justified. An estimate of the level of nonlinear distortions is provided. It is shown that deviations from the linear model may be caused by the excitation amplitude, temperature non-uniformity, and imperfect acoustic coupling. It is proven that under these conditions, the channel can be considered linear.

Key words: *acoustic transformer, linear system, nonlinear acoustics, structurally inhomogeneous channel*

УДК 654.739

ГРНТИ 49.33.29

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБУЧЕНИЕ: ВОССТАНОВЛЕНИЕ
«КОГНИТИВНОГО ТРЕНИЯ» В ЭПОХУ ГЕНЕРАТИВНОГО
ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА****А. В. Качнов, Д. А. Перес-Кальдерон**

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Быстрое развитие искусственного интеллекта (ИИ) трансформировало парадигму технического образования, позволив оперативно решать задачи, которые традиционно требовали длительных когнитивных усилий. В статье анализируется исчезновение «когнитивного трения» и его последствия для процесса обучения. Авторы предполагают, что устранение этих усилий приводит к явной неспособности проверять результаты, полученные с помощью ИИ, потенциально превращая будущих специалистов в посредников в цепочке создания ценности. Авторы предлагают переориентировать обучение: не конкурировать с ИИ в выполнении задач, а сместить фокус внимания на управление неопределенностью, проверке решений в условиях неполной информации и иерархической декомпозиции проблем.

искусственный интеллект, техническое образование, педагогические инновации

Ландшафт инженерного образования претерпел беспрецедентную трансформацию, обусловленную экспоненциальной эволюцией генеративного искусственного интеллекта (ИИ). То, что в 2022 году появилось как инструменты, способные давать расплывчатые или технически некорректные ответы, всего за четыре года превратилось в системы с достаточно высоким уровнем точности, позволяющие генерировать код, который не только функционален, но и корректен в большинстве сложных случаев. Эта быстрая эволюция сделала многие традиционные механизмы оценки устаревшими, особенно те, которые основаны на решении детальных задач и которые теперь могут быть решены ИИ за считанные минуты [1].

Традиционно глубокое обучение, как отмечают Бьорк и Бьорк [2], основывалось на усилиях, необходимых для разбора проблемы, совершения ошибок и их исправления; именно этот процесс формирует память и опыт, необходимые для усвоения фундаментальных концепций. Устраняя барьер усилий, так называемое «когнитивное трение», благодаря немедленному до-

ступу к правильным решениям, студент рискует не сформировать когнитивный след, необходимый для прочной технической подготовки.

Искусственный интеллект, благодаря своей мгновенности, действует как когнитивный протез, затрудняя студентам прохождение следующих этапов:

- продуктивная ошибка: первоначальная ошибка, которая заставляет пересмотреть теорию;
- абстракция: способность находить общие закономерности в результате решения множества аналогичных задач;
- синтез: объединение различных концепций, идей и данных для выработки комплексного решения задачи.

В инженерном образовании, возможность моментально, вместо полноценного лабораторного занятия, решить задачу посредством ИИ ошибочно принимается студентами за собственное понимание проблемы, что создает лишь иллюзию формирования необходимой компетентности.

Одним из наиболее тревожных последствий недостатка собственных усилий является потеря способности критически мыслить. Техническое суждение студентов должно формироваться не в результате пассивного изучения материала, а в результате накопления опыта работы с ошибками. Отсутствие у студентов достаточного опыта самостоятельного анализа кода препятствует формированию у них инженерной интуиции, которая критически важна для верификации ответов искусственного интеллекта.

Данный процесс приводит к возникновению порочного круга: минимизация когнитивных усилий ведет к уменьшению базы знаний, что, ставит студентов в полную зависимость от ИИ и снижает их способность анализировать и критически оценивать полученные результаты. В конечном итоге мы рискуем подготовить специалистов, которые управляют сложными системами как «черными ящиками», не имея возможности реального вмешательства в случае сбоя автоматизации.

Тревожным симптомом этого недостатка углубленной подготовки является неспособность сформулировать проблему. Искусственный интеллект требует точных инструкций, но для их предоставления необходимо понимать лежащую в основе архитектуру проблемы. Без способности разбить сложную проблему на решаемые подзадачи инженер теряет свою основную функцию: архитектуру решений.

В инженерии концепция «черного ящика» традиционно относилась к системам, где нам известны только входные и выходные данные, игнори-

руя внутренний процесс. Делегируя решение технических проблем искусственному интеллекту, мы превращаем собственные знания инженера в «черный ящик». Студент «получает» решение, но не «владеет» им, поскольку ему не хватает ментальной прослеживаемости, которая привела к этому результату.

В этом заключается тревожный парадокс: мы использовали десятилетия глубоких знаний, когнитивных усилий и критического мышления для создания технологии, способной имитировать сложные процессы. Однако та же самая технология создает среду, в которой новые поколения больше не нуждаются и, следовательно, не развивают навыки, необходимые для продолжения инноваций.

Если техническое обучение сведется к подготовке «операторов инструментов», а не «создателей технологий», темпы прогресса замедлятся. ИИ может совершенствовать то, что уже знает, но истинный прорыв – нестандартное мышление – требует человеческой интуиции, которая формируется только благодаря абсолютному овладению фундаментальными принципами.

Устраняя необходимость прилагать усилия, мы устанавливаем искусственный потолок для талантов. Без упомянутого ранее «трения» мозг не развивает способность обрабатывать высокоуровневые абстракции. Мы жертвуем глубиной будущего ради скорости настоящего.

Прямым следствием эрозии критического мышления является профессиональное устаревание еще до начала работы. В современной продуктивной экосистеме, если выпускник просто выступает в качестве канала для передачи требований в интерфейс ИИ, он становится ненужным активом. Для организации ценность инженера заключается не в его умении вводить подсказки – навыке, который может приобрести менеджер или конечный клиент, – а в его способности обеспечить безопасность, эффективность и масштабируемость решения. Абсолютная зависимость порождает опасную техническую слепоту. Профессионал, не развивший необходимые когнитивные навыки методом проб и ошибок, не способен определить, когда ИИ выдал «галлюцинацию» в качестве решения или предложил код с уязвимостями безопасности. Эта неспособность к аудиту превращает сотрудника в риск для компании: стоимость исправления структурной ошибки, сгенерированной ИИ и не обнаруженной вовремя, часто в несколько раз выше, чем стоимость разработки решения с нуля.

В связи с вышесказанным техническое образование должно срочно измениться. Отличительная ценность будущего инженера будет заключаться уже не в механическом решении проблем, а в:

- *выявлении закономерностей*: определение типа решения, необходимого в контексте проблемы, и оценка того, является ли предложенная ИИ закономерность оптимальной или просто наиболее вероятной;
- *аудите результатов*: возможность проведения стресс-тестов, проверки безопасности и оптимизации ресурсов на основе автоматически сгенерированных результатов;
- *технической ответственности*: ИИ не утверждает проекты и не несет юридических последствий; это делает инженер; эта ответственность требует глубоких знаний, которые приобретаются только в результате когнитивных «трений» на этапе обучения.

Для превращения ИИ из препятствия в высокоэффективный инструмент техническое образование должно отказаться от модели «детерминированных инструкций» (где утверждение А соответствует решению В) и принять методологию, основанную на следующих фундаментальных принципах.

Управление неопределенностью и «неполной формулировкой»: ИИ чрезвычайно эффективен в решении четко определенных задач, но посредственен в обработке неопределенности или противоречивых требований. Задания должны развиваться в сторону формулировок с недостаточно определенными параметрами. Вместо предоставления всех переменных (частот, степеней, расстояний) следует представить расплывчатый пользовательский сценарий, чтобы заставить студента принимать проектные решения еще до использования инструмента. Если студент не может определить границы проблемы, ИИ выдаст общее и неприменимое решение. Усилия смещаются от выполнения к критической спецификации.

Цикл верификации и валидации как центральная ось: если ИИ отвечает за генерацию, то люди должны отвечать за валидацию. Мы предлагаем внедрить процесс «двойного слепого тестирования» или аудита: «Сгенерированный результат» представляется как гипотеза, а не как тезис. Студент должен представить вместе с решением ИИ набор стресс-тестов и контрпримеров, демонстрирующих работоспособность решения в критических условиях (границы системы, шум, помехи) с целью развития навыков технического мониторинга. Студент оценивается не по тому, что ИИ «умеет» делать, а по его способности продемонстрировать, где и почему ИИ может дать сбой.

Иерархическая и модульная декомпозиция: чтобы избежать эффекта «черного ящика», методология должна запрещать одноразовые подсказки для решения сложных задач [3]. Преподаватель должен ввести концепцию обязательной фрагментации. Студент должен разложить задачу на основные функциональные блоки и проверить каждый блок по отдельности, прежде чем интегрировать их. Это гарантирует, что студент понимает архитектуру задачи. Благодаря модульному взаимодействию гарантируется понимание студентом интерфейса между компонентами (например, между физическим и информационным уровнями), что предотвращает превращение окончательного решения в непрозрачный блок знаний.

Ответственность и техническое обоснование (защита решения): в профессиональной среде инженер подписывает проект и принимает на себя юридическую и этическую ответственность [4][5]. В процессе обучения студент должен уметь интерпретировать и защищать решения ИИ наравне с собственными разработками. Отсутствие навыка обоснования выбранных решений и алгоритмов является недостаточностью квалификации, что полностью нивелирует концепцию «компетентность по доверенности». Данный подход подтверждает идею о том, что сам инженер выступает конечным гарантом качества продукта, в то время как ИИ рассматривается как вспомогательный инструмент, требующий детального изучения и контроля.

Данный подход качественно повышает требования к инженерному образованию: его целью становится не подготовка узкопрофильных программистов, но системных архитекторов, обладающих развитым критическим мышлением. Уровень подготовки должен быть существенно углублен, так как анализ и оценка решений ИИ требует более фундаментального понимания предметной области.

В качестве примера рассмотрим классическое практическое упражнение из курса цифровой обработки сигналов: спектральный анализ сигнала, состоящего из двух чистых тонов частотой 10 Гц и 12 Гц. Генеративный ИИ-помощник может за считанные секунды создать полностью функциональный скрипт MATLAB, который вычисляет дискретное преобразование Фурье (ДПФ) и отображает полученный спектр. В рамках традиционной парадигмы студенты тратили время на отладку циклов и синтаксических ошибок. В парадигме ИИ это препятствие исчезло.

Однако истинное обучение в телекоммуникациях заключалось не в наборе соответствующего кода, а в физической интерпретации результа-

тов. Представленное здесь методологическое предложение переформулирует это утверждение следующим образом:

«Создайте базовый скрипт для визуализации спектра с использованием ИИ. Затем сравните спектры, полученные с длинами БПФ $N=10$, $N=20$, $N=64$, $N=128$ и $N=256$, обосновав, почему форма основных лепестков изменяется даже без трансформации исходного сигнала. Примените заполнение нулями до $N=512$ и объясните, почему, хотя график выглядит «более гладким», фактическое разрешение спектра не улучшилось. Наконец, аналитически определите минимальную длину БПФ, необходимую для визуального однозначного различения двух тонов 10 и 12 Гц».

В этом новом сценарии ИИ решает задачи программирования (средства), но студенту обязательно нужно опираться на свои знания теоремы выборки, неявного оконного анализа и взаимосвязи между частотой выборки и точностью частоты, чтобы ответить на вопросы аудита (конечная цель). Следует отметить, что низкие значения N намеренно создают спектр с низким разрешением, заставляя студента определить физическую причину этого ухудшения. Кроме того, ключевой параметр частоты выборки намеренно оставлен на усмотрение студента, что усиливает принцип неоднозначности. Этот сдвиг когнитивных усилий от синтаксиса к физике системы является ядром модели инженера-аудитора.

В заключение, ИИ повышает профессиональный уровень: будущий инженер должен знать больше фундаментальных принципов, чем когда-либо прежде, чтобы выступать в роли аудитора машины. Решение состоит не в запрете инструмента, а в разработке новой когнитивной структуры, основанной на неоднозначности и валидации.

Список использованных источников

1. Here's why AI makes traditional education models obsolete // World Economic Forum Articles, September 2023.
2. Bjork R. A. and Bjork E. L. Making things hard on yourself, but in a good way: Creating desirable difficulties to enhance learning // in Psychology and the Real World: Essays Illustrating Fundamental Contributions to Society, M. A. Gernsbacher et al., Eds., New York: Worth Publishers, 2011. PP. 56-64.
3. White J. et al. A Prompt Pattern Catalog to Enhance Prompt Engineering with ChatGPT // arXiv preprint arXiv:2302.11382, 2023.
4. UNESCO. Guidance for generative AI in education and research // United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, Paris, France, 2023. Available: unesco.org.
5. Ethically Aligned Design: A Vision for Prioritizing Human Wellbeing with Autonomous and Intelligent Systems // 1st ed., IEEE, IEEE Global Initiative on Ethics of Autonomous and Intelligent Systems. 2019.

**TECHNICAL EDUCATION: RECOVERING «COGNITIVE FRICTION»
IN THE ERA OF GENERATIVE ARTIFICIAL INTELLIGENCE**

Kachnov A., Perez-Calderon D.

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

The rapid development of artificial intelligence (AI) has transformed the paradigm of engineering education, enabling the rapid solution of problems that traditionally required lengthy cognitive effort. This article analyzes the disappearance of «cognitive friction» and its implications for the learning process. We postulate that the elimination of this effort leads to a clear inability to verify AI-generated results, potentially turning future professionals into intermediaries in the value chain. We propose that instead of competing with AI task performance, learning should shift toward managing uncertainty, testing solutions under adversarial conditions, and hierarchical problem decomposition.

Key words: *artificial intelligence, engineering education, pedagogical innovations*

УДК 621.395
ГРНТИ 49.33.29**СВОЙСТВА ИНТЕГРАЛЬНЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ
ЭРЛАНГА И ЭНГСЕТА****Ю. Ф. Кожанов**

Санкт-Петербургский государственный университет им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В настоящее время для расчета вероятностно-временных характеристик систем коммутации различного типа широко применяются дискретные распределения Эрланга и Энгсета. Существенным ограничением таких распределений является тип исходных данных: число обслуживающих приборов (каналов связи), число источников нагрузки и число мест ожидания обязательно должны быть целыми числами. Во многих практических случаях эти требования непригодны. В статье рассматриваются вероятностно-временные характеристики распределения вероятностей с произвольными типами исходных данных.

вероятность потерь, функция распределения, время ожидания, очередь

Давно известны и широко применяются на практике классические распределения Эрланга и Энгсета. Они характеризуются тем, что число обслуживаемых приборов (емкость полнодоступного пучка V), число источников нагрузки N , число мест ожидания K обязательно должны быть целыми числами. Для некоторых практических случаев, которые приведены ниже, это является существенным ограничением. В этих случаях следует использовать интегральные распределения, снимающие эти ограничения.

Свойства интегрального распределения Эрланга

Классическая (дискретная) формула Эрланга для систем с явными потерями определяет стационарное распределение вероятностей [1, 2]

$$[x] = \frac{(\lambda/\mu)^x}{x!} \left[\sum_{i=0}^V \frac{(\lambda/\mu)^i}{i!} \right]^{-1} = \frac{A^x}{x!} [0], \quad x = 0, 1 \dots V,$$

где $A = \lambda/\mu$ – поступающая нагрузка **первого рода**.

Финальная вероятность

$$[V] = E_V(A) = \frac{A^V}{V!} \left[\sum_{i=0}^V \frac{A^i}{i!} \right]^{-1} = \frac{A^V}{V!} [0]$$

определяет потери по времени в полнодоступном пучке и носит название **первой формулы Эрланга**.

В [3] представлена интегральная формула Эрланга в виде

$$[V] = E_V(A) = \frac{A^V e^{-A}}{\int_A^\infty y^V e^{-y} dy},$$

которая в более компактном виде выведена в [4]

$$[V] = E_V(A) = \frac{A^V}{\int_0^\infty (A+z)^V e^{-z} dz} = \frac{A^V}{I(V;A)},$$

позволяющая вычислять вероятность потерь при любых значениях A и V .

Для нее верно рекуррентное соотношение

$$E_V(A) = \frac{A E_{V-1}(A)}{V + A E_{V-1}(A)}$$

с начальным значением

$$E_v(A) = \frac{A^v}{I(v; A)},$$

где $v = V - INT(V)$ – дробная часть емкости пучка.

Отметим следующие полезные свойства интегральной формулы Эрланга.

1. Из очевидного равенства

$$[V] = E_V(A) = \frac{A^V}{V!} \left[\sum_{i=0}^V \frac{A^i}{i!} \right]^{-1} = \frac{A^V}{\int_0^\infty (A+z)^V e^{-z} dz}$$

при $A = 0$ следует, $V! = I(V; 0) = \int_0^\infty z^V e^{-z} dz$ для любого действительного $V > 0$. Например, $5,6! = I(5,6; 0) = \int_0^\infty z^{5,6} e^{-z} dz = 344,7$.

2. Принимая $V = v + C$, получим $V! = v! \prod_{i=1}^C (v + i)$.

Например, $5,6! = 0,6! \prod_{i=1}^5 (v + i) = 0,8935 \cdot 1,6 \cdot 2,6 \cdot 3,6 \cdot 4,6 \cdot 5,6 = 344,7$;

$$\begin{aligned} -0,7! &= \frac{(1-0,7)!}{(1-0,7)} = \frac{0,3!}{0,3} = \frac{I(0,3;0)}{0,3} = \frac{0,8974}{0,3} = 2,9915; \\ -1,7! &= \frac{(1-1,7)!}{(1-1,7)} = \frac{-0,7!}{(1-1,7)} = \frac{1}{(1-1,7)} \frac{(1-0,7)!}{(1-0,7)} = \frac{1}{(1-1,7)} \frac{0,3!}{(1-0,7)} = -4,2736; \\ -2,7! &= \frac{(1-2,7)!}{(1-2,7)} = \frac{1}{(1-2,7)} \frac{1}{(1-1,7)} \frac{(1-0,7)!}{(1-0,7)} = 2,5139; \\ -3! &= \frac{1}{(1-3)} \frac{1}{(1-2)} \frac{(1-1)!}{(1-1)} = \infty; \\ -3,7! &= \frac{1}{(1-3,7)} \frac{1}{(1-2,7)} \frac{1}{(1-1,7)} \frac{(1-0,7)!}{(1-0,7)} = -0,931. \end{aligned}$$

3. Сумма в дискретной формуле Эрланга вычисляется как

$$\sum_{i=0}^V \frac{A^i}{i!} = \frac{I(V;A)}{I(V;0)}.$$

Например, $\sum_{i=0}^{5,6} \frac{3,2^i}{i!} = \frac{I(5,6;3,2)}{I(5,6;0)} = \frac{7916,83}{344,7} = 22,97.$

4. Для вычисления интегрального распределения вероятностей состояний пучка емкостью $V = v + C$ следует вычислить значения членов ряда.

Нулевой член ряда

$$met\{0\} = \frac{A^{v-1}}{(v-1)!},$$

первый член ряда

$$met\{v\} = met\{0\} \frac{A}{v} = \frac{A^v}{v!},$$

второй член ряда

$$met\{v+1\} = met\{v\} \cdot \frac{A}{(v+1)} = \frac{A^{v+1}}{(v+1)!},$$

...

последний член ряда

$$met\{v+C\} = met\{V\} = \frac{A^V}{V!}.$$

Тогда сумма всех членов ряда

$$sum = \sum_{x=0}^V met\{x\} = \frac{I(V;A)}{I(V;0)},$$

а вероятность состояния $\{x\}$

$$[x] = met\{x\}/sum.$$

Представим себе 5-линейный пучок с возникновением и устранением неисправностей, на который поступает пуассоновская нагрузка $A = 3$ Эрл.

В течение времени наблюдения в 50 % случаев пучок имел емкость 3 линии ($P_3 = 0,5$), в 30 % случаев – 4 линии ($P_4 = 0,3$), в 20 % случаев – 5 линий ($P_5 = 0,2$). Средняя емкость пучка равна $V = 3,7$ линии. Это означает, что в 50 % случаев распределение вероятностей состояний пучка подчиня-

лась дискретному распределению в 3-х линейном пучке, в 30 % случаев – дискретному распределению в 4-х линейном пучке и только в 20 % случаев – дискретному распределению в 5-и линейном пучке.

Интегральное распределение вероятностей состояний пучка емкостью $V=3,7$ линий является *виртуальным* и определяет вероятность потерь $E_{3,7}(3)$ в абсолютно надежном 3,7-линейном пучке. Видимое распределение вероятностей в 5-линейном ненадежном пучке (доля обслуженных вызовов) находится по формуле

$$VIZ[5;k] = D[3;k] P(3) + D[4;k] P(4) + D[5;k] P(5) ,$$

где $D[x;k]$ – вероятность нахождения в состоянии $\{k\}$ дискретного распределения в надежном x -линейном пучке.

На рис. 1 приведены дискретные вероятности состояний в надежном 5-линейном пучке $D[5;k]$ и визуально наблюдаемое $VIZ[5;k]$ распределение.

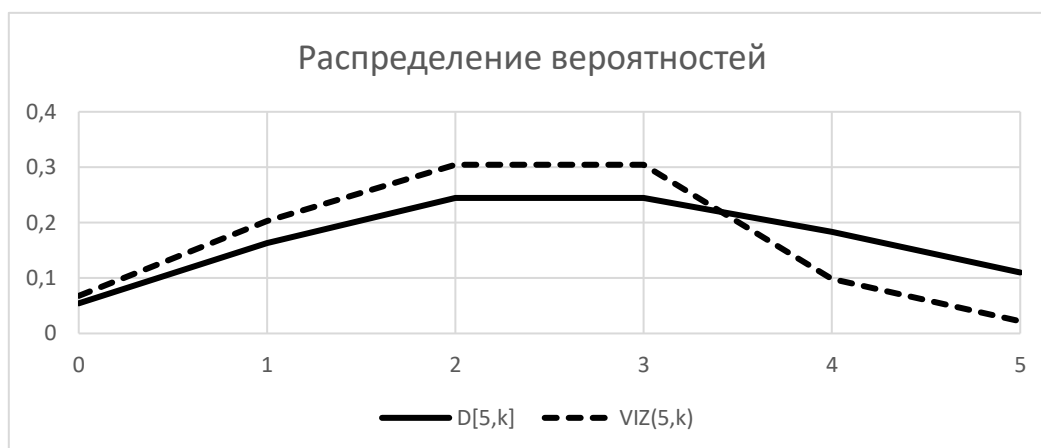


Рис. 1. Функции распределения состояний

Естественно, доля обслуженных вызовов 5-ой линией ненадежного пучка $VIZ[5;5] = 0,022 < D[5;5] = 0,11 < E_{3,7}(3) = 0,243$, поскольку в состоянии с 5-ю занятыми линиями пучок пребывал только 20 % времени.

Рассмотрим практическое использование интегральных соотношений Эрланга для системы с явными потерями.

Пример 1. Вычислить вероятность потерь на пучке из $V = 11,5$ линий при поступлении на него нагрузки $A = 10$ Эрланг по интегральной формуле Эрланга. Вычислите ту же вероятность методом линейной экстраполяции по дискретной формуле Эрланга. Объясните разницу в полученных результатах.

Решение.

По дискретной формуле Эрланга вероятность потерь $E_{11}(10) = 0,1632$.

По дискретной формуле Эрланга вероятность потерь $E_{12}(10) = 0,1197$.
Согласно линейной экстраполяции

$$E_{11,5}(10) = E_{11}(10) - \frac{E_{11}(10) - E_{12}(10)}{2} = 0,1415.$$

По интегральной формуле Эрланга

$$E_{11,5}(10) = \frac{10^{11,5}}{\int_0^\infty (10+z)^{11,5} e^{-z} dz} = 0,1405.$$

Разница в результатах объясняется тем, что зависимость вероятности потерь от емкости пучка не является линейной.

Разница значительно уменьшается при $V \gg A$.

Пример 2. На полнодоступный 1000-линейный пучок в ЧНН поступает нагрузка $A = 900$ Эрланг. В течение 20 минут ЧНН пучок был исправен, в течение последующих 20 минут вышли из строя 200 линий пучка, а затем неисправность устранили. Определить обслуженную нагрузку.

Решение.

Средняя емкость пучка в ЧНН – $V = 1000/3 + 800/3 + 1000/3 = 933,33$. Подставляя значения $A = 900$, $V = 933,33$ в интегральную формулу Эрланга находим потери $E_{933,33}(900) = 0,0081$ и обслуженную нагрузку $As = A(1 - E_V(A)) = 892,658$ Эрланг.

Пример 3. Вычислить интегральное распределение вероятностей в 4,166 линейном пучке при поступлении на него нагрузки 3 Эрланг.

Решение.

$$V = 4,166; v = V - \text{INT}(V) = 0,166; C = V - v = 4.$$

$$\text{tem}\{0\} = \frac{A^{v-1}}{(v-1)!} = \frac{3^{-0,8334}}{-0,8334!} = \frac{0,4}{5,5686} = 0,0719;$$

$$\text{tem}\{0,1666\} = \text{tem}\{0\} \frac{A}{v} = \frac{A^v}{v!} = \frac{3^{0,1666}}{0,1666!} = 1,2944;$$

$$\text{tem}\{1,1666\} = \text{tem}\{0,1666\} \frac{A}{(v+1)} = \frac{A^{v+1}}{(v+1)!} = \frac{3^{1,1666}}{1,1666!} = 3,3289;$$

$$\text{tem}\{2,1666\} = \text{tem}\{1,1666\} \frac{A}{(v+2)} = \frac{A^{v+2}}{(v+2)!} = \frac{3^{2,1666}}{2,1666!} = 4,6092;$$

$$\text{tem}\{3,1666\} = \text{tem}\{2,1666\} \frac{A}{(v+3)} = \frac{A^{v+3}}{(v+3)!} = \frac{3^{3,1666}}{3,1666!} = 4,3667;$$

$$\text{tem}\{4,1666\} = \text{tem}\{3,1666\} \frac{A}{(v+4)} = \frac{A^{v+4}}{(v+4)!} = \frac{3^{4,1666}}{4,1666!} = 3,1441;$$

$$\text{sum} = \sum_{x=0}^V \text{tem}\{x\} = \frac{I(V;A)}{I(V;0)} = \frac{I(4,1666;3)}{I(4,1666;0)} = \frac{519,849}{30,9416} = 16,815;$$

Тогда

$$\begin{aligned}
[0] &= \text{mem}\{0\}/\text{sum} = 0,0043; \\
[0,1666] &= \text{mem}\{0,1666\}/\text{sum} = 0,0770; \\
[1,1666] &= \text{mem}\{1,1666\}/\text{sum} = 0,1980; \\
[2,1666] &= \text{mem}\{2,1666\}/\text{sum} = 0,2741; \\
[3,1666] &= \text{mem}\{3,1666\}/\text{sum} = 0,2597; \\
[4,1666] &= \text{mem}\{4,1666\}/\text{sum} = 0,1870.
\end{aligned}$$

По интегральной формуле Эрланга $E_{4,1666}(3) = 0,1870$.

Классическая (дискретная) формула Эрланга для систем с ожиданием без потерь определяет стационарное распределение вероятностей

$$\left| \begin{aligned} [x] &= \begin{cases} \frac{A^x}{x!} [0], & 0 \leq x \leq V, \\ \frac{A^V}{V!} \left(\frac{A}{V}\right)^{x-V} [0], & x \geq V, \end{cases} \end{aligned} \right. \quad (1)$$

где $[0]$ определяется из нормирующего условия

$$[0]^{-1} = \sum_{x=0}^V \frac{A^x}{x!} + \frac{A^V}{V!} \sum_{x=V+1}^{\infty} \left(\frac{A}{V}\right)^{x-V} \Big|_{A < V} = \sum_{x=0}^V \frac{A^x}{x!} + \frac{A^V}{V!} \frac{A}{V-A},$$

а вероятность состояния $\{V\}$ равна $[V] = \frac{A^V}{V!} [0] = \frac{(V-A)E_V(A)}{V-A+A \cdot E_V(A)}$.

Средняя длина очереди равна $Q_w = \sum_{k=V+1}^{\infty} (k-V) \cdot [k] = \frac{A \cdot V}{(V-A)^2} \cdot [V]$,

среднее число вызовов в обслуживании $Q_s = A$,

среднее число вызовов в системе $Q_e = Q_w + Q_s = \frac{A \cdot V}{(V-A)^2} \cdot [V] + A$.

Потери по времени равны вероятности того, что вызов не будет принят к обслуживанию немедленно и встанет в очередь

$$P_t = P(> 0) = \sum_{x=V}^{\infty} [x] = \frac{A^V}{V!} [0] \sum_{x=V}^{\infty} \left(\frac{A}{V}\right)^{x-V} = \frac{V}{V-A} [V] = \frac{V \cdot E_V(A)}{V-A+A \cdot E_V(A)} < 1. \quad (2)$$

(2) – *вторая формула Эрланга*.

Практическое применение интегрального распределения Эрланга для системы с ожиданием без потерь рассмотрим на следующем примере.

Пример 4. В многофункциональный центр (МФЦ) в час наибольшей нагрузки поступает $\lambda = 18$ обращений (вызовов) в час. Среднее время обработки одного вызова $t_s = 10$ минут. Число операторов по обработке вызовов $N = 5$. Каждый из операторов попеременно в течение часа использует технологический перерыв длительностью 10 минут. Определить вероятность

немедленного обслуживания и среднее время ожидания начала обслуживания.

Решение.

Поступающая нагрузка $A = \lambda \cdot ts = 3$ Эрл. Из-за технологического перерыва среднее число операторов равно $V = 5 \cdot N/6 = 4,166$, $C = \text{INT}(V) = 4$, $v = V - C = 0,166$.

В соответствии с примером 3 и формулой (1)

$$\begin{aligned} sum &= \sum_{x=0}^{\infty} tem\{x\} = \sum_{x=0}^V tem\{x\} + tem\{V\} \sum_{x=1}^{\infty} \left(\frac{A}{V}\right)^x = \\ &= \sum_{x=0}^V tem\{x\} + tem\{V\} \frac{A}{V-A} = 16,8148 + 3,1438 \cdot 2,5715 = 24,899. \end{aligned}$$

Вероятность состояния $\{V\} = \{4,166\}$

$$[V] = \frac{tem\{V\}}{sum} = \frac{3,1438}{24,8980} = 0,126.$$

Вероятность немедленного обслуживания с использованием (2)

$$P_{im} = 1 - P(> 0) = 1 - [V] \frac{V}{V-A} = 1 - 0,126 \frac{4,166}{4,166-3} = 0,55.$$

Средняя длина очереди

$$Q_w = [V] \sum_{x=V+1}^{\infty} \left(\frac{A}{V}\right)^{x-V} (x - V) = [V] \frac{A \cdot V}{(V-A)^2} = 0,126 \frac{3 \cdot 4,166}{(4,166-3)^2} = 1,159.$$

Среднее время ожидания начала обслуживания [5]

$$tw = \frac{Q_w}{\lambda} = \frac{1,159}{0,3} \text{ минут} = 3,86 \text{ минут}.$$

Без технологического перерыва ($V = N = 5$) среднее время ожидания начала обслуживания было бы $tw = 1,18$ минут.

Свойства интегрального распределения Энгсета

В [4] выведена интегральная формула Энгсета

$$[V] = E_{N,V}(A) = \frac{A^V}{\int_0^{\infty} (1 + A - e^{-\frac{z}{N-V}})^V e^{-z} dz} = \frac{A^V}{I(N; V; A)},$$

Интегральная формула Энгсета позволяет производить расчет потерь при любых действительных положительных значениях N , V , A .

Отметим следующие полезные свойства интегральной формулы Энгсета.

1. Из очевидного равенства

$$[V] = E_{N,V}(A) = C_N^V A^V \left[\sum_{i=0}^V C_N^i A^i \right]^{-1} = \frac{A^V}{\int_0^\infty (1+A-e^{-\frac{z}{N-V}})^V e^{-z} dz}$$

при $A = 0$ следует, что $C_N^V = \frac{1}{\int_0^\infty (1-e^{-\frac{z}{N-V}})^V e^{-z} dz}$ для любых действительных положительных V и N . Например, $C_{5,8}^{3,3} = 16,874$.

2. Для вычисления интегрального распределения вероятностей состояний пучка емкостью $V = v + C$ следует вычислить значения членов ряда.

Нулевой член ряда

$$mem\{0\} = \frac{N!}{(v-1)!(N-v+1)} A^{v-1} = C_N^{v-1} A^{v-1},$$

первый член ряда

$$mem\{v\} = mem\{0\} \frac{(N-v+1)}{v} A = C_N^v A^v,$$

второй член ряда

$$mem\{v+1\} = mem\{v\} \cdot \frac{(N-v)}{(v+1)} A = C_N^{v+1} A^{v+1},$$

...

последний член ряда

$$mem\{v+C\} = mem\{V\} = mem\{V-1\} \frac{(N-V+1)}{V} A = C_N^V A^V,$$

Тогда сумма всех членов ряда

$$sum = \sum_{x=0}^V mem\{x\},$$

а вероятность состояния $\{x\}$

$$[x] = mem\{x\}/sum.$$

Для интегральной формулы Энгсета верно рекуррентное соотношение

$$E_{N,V}(A) = \frac{A(N-V+1)E_{N,V-1}(A)}{A(N-V+1)E_{N,V-1}(A) + V}$$

с начальным значением

$$E_{N,v}(A) = \frac{A^v}{I(N; v; A)},$$

где $v = V - INT(V)$ – дробная часть исправной емкости пучка.

Интегральная формула Энгсета используется при расчете потерь в пучке малой емкости при нецелочисленных значениях N, V, A .

Пример 5. Вычислить интегральное распределение Энгсета в 4,1666 линейном пучке при удельной нагрузке $a=0,75$ Эрланг. Число источников нагрузки $N=7$.

Решение.

$$\begin{aligned}
 A &= a/(1-a) = 3 \text{ Эрл}; \quad v = 0,1666; \\
 \text{мет}\{0\} &= \frac{N!}{(v-1)! \cdot (N-v+1)!} A^{v-1} = \frac{7!}{-0,8334! \cdot 7,8334!} 3^{-0,8334} = 0,0128; \\
 \text{мет}\{0,1666\} &= \text{мет}\{0\} \frac{(N-v+1)}{v} A = 0,0128 \frac{7,8334}{0,1666} 3 = 1,807, \\
 \text{мет}\{1,1666\} &= \text{мет}\{0,1666\} \cdot \frac{(N-v)}{(v+1)} A = 1,807 \frac{6,8334}{1,1666} 3 = 31,75, \\
 \text{мет}\{2,1666\} &= \text{мет}\{1,1666\} \frac{(N-v-1)}{v+2} A = 31,75 \frac{5,8334}{2,1666} 3 = 256,45, \\
 \text{мет}\{3,1666\} &= \text{мет}\{2,1666\} \frac{(N-v-2)}{v+3} A = 256,45 \frac{4,8334}{3,1666} 3 = 1174,34, \\
 \text{мет}\{4,1666\} &= \text{мет}\{3,1666\} \frac{(N-v-3)}{v+4} A = 1174,34 \frac{3,8334}{4,1666} 3 = 3241,29, \\
 \text{sum} &= \sum_{x=0}^V \text{мет}\{x\} = 4705,664.
 \end{aligned}$$

Тогда

$$\begin{aligned}
 [0] &= \text{мет}\{0\}/\text{sum} = 0,000003; \\
 [0,1666] &= \text{мет}\{0,1666\}/\text{sum} = 0,0004; \\
 [1,1666] &= \text{мет}\{1,1666\}/\text{sum} = 0,0067; \\
 [2,1666] &= \text{мет}\{2,1666\}/\text{sum} = 0,0545; \\
 [3,1666] &= \text{мет}\{3,1666\}/\text{sum} = 0,2496; \\
 [4,1666] &= \text{мет}\{4,1666\}/\text{sum} = 0,6888.
 \end{aligned}$$

По интегральной формуле Энгсета $[4,1666] = E_{7; 4,1666}(3) = 0,6888$.

Пример 6. Учрежденческая АТС на $N = 70$ номеров связана с сетью связи через пучок $V = 30$ линий. Удельная нагрузка от одного абонента $a = 0,4$ Эрл. После 10 минут исправной работы в ЧНН вышли из строя 5 абонентских линий и восстановились после 40 минут. Определить потери по вызовам.

Решение.

Пуассоновская нагрузка второго рода $A = a/(1-a) = 0,66$ Эрл.

Среднее число абонентов $Nm = [0] = \frac{10}{60} 70 + \frac{40}{60} 65 + \frac{10}{60} 70 = 66,6$ абонентов.

Потери по вызовам

$$E_{Nm-1;V}(A) = E_{65,6;30}(0,66) = 0,0736.$$

При отсутствии неисправностей потери по вызовам $E_{69,30}(0,66) = 0,1064$. Снижение числа абонентов привело к снижению потерь.

Список используемых источников

1. Лившиц Б. С. Теория телефонных и телеграфных сообщений // Б. С. Лившиц, Я. В. Фидлин, А. Д. Харкевич. М.: Связь, 1971. 304 с.
2. Пшеничников А. П. Теория телетрафика. Учебник для вузов // А. П. Пшеничников. М.: Горячая линия-Телеком, 2024. 212 с.
3. Шнепс М. А. Системы распределения информации. Методы расчета.: Справ. пособие. М.: Связь, 1979. 344 с.
4. Кожанов Ю. Ф. Аналитические модели теории телетрафика: учебник для вузов // Ю. Ф. Кожанов. 2-е изд., испр. Санкт-Петербург: Лань, 2025. – 204 с.: ил.
5. Little J. D. C. A Proof for the Queuing Formula: $L = \lambda W$. // Operations Research. 1961. Vol. 9. N 3. P. 383-387.

PROPERTIES OF ERLANG AND ENGSET DISTRIBUTIONS

Kozhanov J.

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

Currently discrete Erlang and Engset distributions are widely used to calculate the probability-time characteristics of various switching systems. A significant limitation of these distributions is the types of initial data: the number of serving devices (communication channels), the size of calling source, and the capacity of queue must be integers. In many practical cases, these requirements are impractical. This article examines the probability-time characteristics of probability distributions with arbitrary types of initial data.

Key words: loss probability, distribution function, waiting time, queue

УДК 621.391.63:681.7.068
ГРНТИ 49.33.29

ДИНАМИЧЕСКАЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ГРУППОВАЯ ЗАДЕРЖКА В ОПТИЧЕСКОМ КАБЕЛЕ ПРИ УДАРЕ МОЛНИИ

О. В. Колесников

Московский технический университет связи и информатики

Рассмотрен механизм возникновения динамической дифференциальной групповой задержки DGD_{dyn} в оптическом волокне одномодового кабеля при прямом ударе молнии. Показано, что при скорости нарастания тока $dI/dt = 10\text{--}50$ кА/мкс скорость изменения состояния поляризации достигает $10^5\text{--}10^6$ рад/с, а суммарная DGD в кабеле ITU-T G.652 длиной 50 км превышает 100 пс и нарушает условие $QBER < 11\%$ протокола BB84 при $R < 100$ м. Получено аналитическое выражение, связывающее DGD_{dyn} со скоростью нарастания тока молнии и параметрами анизотропии волокна.

волоконно-оптическая линия, удар молнии, поляризация, эффект Фарадея, дифференциальная групповая задержка, QBER, BB84, PMD

1. Введение

Исследование влияния молниевых разрядов на оптические кабели, актуально для магистральных когерентных ВОЛС со скоростями 100–400 Гбит/с и систем квантового распределения ключей (КРК) [1–11]. Быстрое изменение магнитного поля молнии вызывает поворот плоскости поляризации светового сигнала вследствие эффекта Фарадея; скорость изменения состояния поляризации SOP при этом достигает $10^5\text{--}10^6$ рад/с [1], что превышает быстродействие алгоритмов DSP когерентных приемников и приводит к росту коэффициента ошибок BER и квантового коэффициента ошибок QBER.

Существующие работы рассматривают стационарную статистику вращения плоскости поляризации в анизотропном волокне [2, 4] и влияние магнитного поля со случайным распределением линейного двулучепреломления [5]. В работах В. А. Кобышева и др. [2] показано, что при ударе молнии возможен временный сбой работы когерентной системы на волокне G.652 длиной 100 км. Однако в известной литературе отсутствует аналитическое выражение, связывающее возникающую при ударе молнии динамическую составляющую дифференциальной групповой задержки DGD_{dyn} с временными параметрами тока молнии и характеристиками анизотропии волокна. Настоящая работа восполняет этот пробел.

2. Матричная модель поляризационных преобразований

В соответствии с подходом, использованным в работе автора [1], волокно длиной L разбивается на N участков; для n -го участка матрица Джонса представляется в виде произведения $J_n = F_n \cdot G_n$, где F_n – матрица кругового двулучепреломления (эффект Фарадея), G_n – матрица линейного двулучепреломления волокна. Элементарное вращение плоскости поляризации на участке dz в магнитном поле $B(t,z)$ описывается выражением

$$d\varphi = 2VB(t,z) dz \quad (1)$$

где $V = 0,53$ рад/(Тл·м) – постоянная Верде одномодового волокна SSMF на длине волны 1550 нм (справочные данные Corning SMF-28, согласованные с [2, 4]). Магнитное поле тока молнии $I(t)$ на расстоянии R от оси разряда определяется выражением:

$$B(t, R) = \frac{\mu_0 I(t)}{2\pi R} \quad (2)$$

Алгоритм расчета магнитного поля тока молнии в зависимости от расстояния от оси разряда представлен на рис. 1.



Рис. 1. Алгоритм расчета: ток молнии → магнитное поле → угол Фарадея → кумулятивный угол → DGD_{dyn} → SOP/QBER

3. Динамическая дифференциальная групповая задержка

Кумулятивный угол поворота поляризации вдоль трассы длиной L при учете случайного распределения двулучепреломления определяется выражением

$$\varphi_{cum}(L) = \frac{CVBL}{\sqrt{L_B L_C}} \quad (3)$$

где L_B – длина биений, $L_B = \lambda/\Delta n$ – пространственный период, на котором две ортогонально поляризованные моды HE_{11x} и HE_{11y} приобретают относительную разность фаз 2π вследствие линейного двулучепреломления (для SSMF при 1550 нм $L_B = 10$ –50 м); L_C – корреляционная длина поляризационной связи мод, средняя длина распространения, на которой ориентация локальных осей двулучепреломления становится некоррелированной (для

SSMF $L_C = 1\text{--}100$ м, типовое значение ≈ 10 м); C – безразмерный коэффициент порядка единицы. Величины L_B и L_C являются независимыми параметрами: первая детерминирована, вторая стохастична [3].

Основной результат настоящей работы – введение динамической составляющей DGD , возникающей вследствие быстрого изменения кумулятивного угла при нарастании тока молнии:

$$DGD_{dyn} = \frac{1}{T_{sym}} \left| \frac{d\varphi_{cum}}{dt} \right| \quad (4)$$

$$\frac{d\varphi_{cum}}{dt} = \frac{CVL}{\sqrt{L_B L_C}} \frac{dB}{dt} = \frac{CVL\mu_0}{2\pi R \sqrt{L_B L_C}} \frac{dI}{dt} \quad (5)$$

где T_{sym} – длительность символа. Выражения (4)–(5) получены в рамках диссертационного исследования автора и в данном виде в литературе не публиковались. Суммарная DGD определяется как квадратичная сумма независимых статического и наведенных вкладов согласно статистике РМД Гордона–Когельника [3]:

$$DGD_{total} = \sqrt{DGD_0^2 + DGD_{loc}^2 + DGD_{dyn}^2} \quad (6)$$

где DGD_0 – паспортная статическая DGD невозмущенного волокна; DGD_{loc} – локальная DGD , наведенная эффектами Фарадея и Керра в полях разряда; DGD_{dyn} – динамическая DGD , порождаемая производной кумулятивного угла $d\varphi_{cum}/dt$.

4. Численные результаты

Расчеты выполнены для трех типов волокон (ITU-T G.652 [6], G.653, G.655) при длине линии $L = 50$ км, пиковом токе молнии $I_{peak} = 30$ кА, расстоянии $R = 1$ м и скорости нарастания тока $dI/dt = 30$ кА/мкс. Результаты расчетов сведены в таблицу 1.

ТАБЛИЦА 1. Составляющие DGD для типовых волокон при ударе молнии (DGD_{total} – по формуле (6))

Волокно	L_B , м	DGD_0 , пс	DGD_{loc} , пс	DGD_{dyn} , пс	DGD_{total} , пс
G.652	23,5	35–100	44	15–30	57–115
G.653	10	18–35	58	20–40	65–82
G.655	20	35–75	28	12–25	46–85

Из таблицы 1 видно, что вклад DGD_{dyn} составляет 15–40 пс, что сопоставимо с допуском на межсимвольные искажения $T_{\text{sym}}/10$ (10 пс для 10 Гбод и 1 пс для 100 Гбод). При скорости 100 Гбод нарушение работы когерентного приемника наблюдается при любых $R < 200$ м для всех трех типов волокон (см. рис. 2).

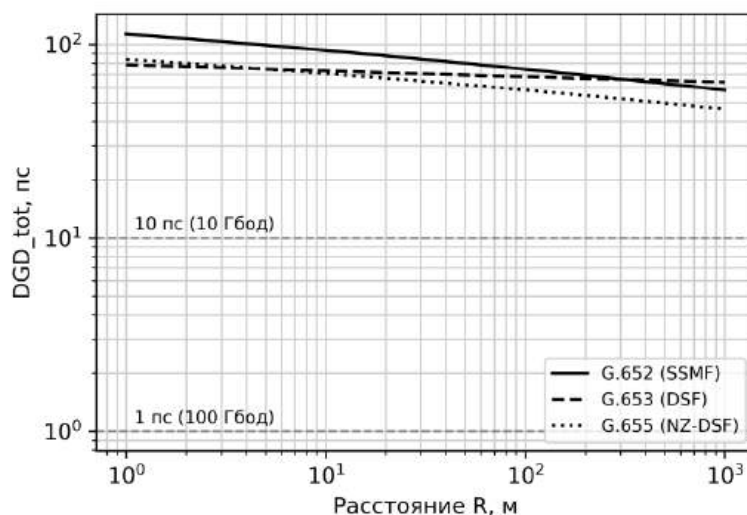


Рис. 2. Суммарная DGD_{tot} в зависимости от расстояния R до удара молнии для волокон G.652, G.653 и G.655 при $I_{\text{peak}} = 30$ кА

5. Влияние на QBER протокола BB84

Для системы КРК BB84 в базисе H/V значение $QBER$ выражается через первую компоненту вектора Стокса [1]:

$$QBER(t) = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{S_1(t)}{S_0} \right) \quad (7)$$

Как установлено в работе автора [1], при $R < 100$ м значение $QBER$ превышает критическое 11 % на интервале 30–50 мкс, а при $R < 10$ м достигает 50–54 % [1]. В настоящей работе показано, что эти эффекты обусловлены именно динамической составляющей DGD_{dyn} , вносящей быстро меняющуюся задержку между поляризационными модами в момент прохождения фронта тока молнии. Это позволяет перейти от эмпирического описания к аналитическому прогнозированию пороговых условий отказа QKD по параметрам удара молнии.

6. Заключение

Впервые получено аналитическое выражение (4)–(5) для динамической составляющей дифференциальной групповой задержки DGD_{dyn} , возникающей в одномодовом оптическом волокне при ударе молнии, и записано квадратичное правило сложения независимых вкладов DGD_{total} (6) в соответствии со статистикой PMD Гордона–Когельника [4]. Показано, что DGD_{dyn} сопоставима по величине со статической PMD и определяет пороговые условия отказа когерентных систем со скоростями выше 10 Гбод и систем КРК, работающих по протоколу BB84. Результаты согласуются с экспериментальными данными [1] и развивают положения работ [2, 4, 5] введением аналитической зависимости DGD от dI/dt и параметров анизотропии волокна.

Список используемых источников

1. Колесников О. В., Белова О. С., Болотов Д. В., Паимцев Г. П. Эффекты Фарадея и Керра в оптическом волокне при воздействии электромагнитного поля токов молнии // Электросвязь. 2026. № 4. С. 139–142.
2. Конышев В. А., Лукиных Т. О., Наний О. Е. и др. Влияние ударов молнии на работу когерентной системы связи на основе ВОЛС-ВЛ // Прикладная фотоника. 2020. Т. 7. № 2. С. 118–129.
3. Gordon J. P., Kogelnik H. PMD fundamentals: Polarization mode dispersion in optical fibers // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 2000. Vol. 97. № 9. P. 4541–4550. DOI: 10.1073/pnas.97.9.4541.
4. Горбатов Д. В., Конышев В. А., Лукиных Т. О. и др. Влияние анизотропии одномодового волокна на индуцированный молнией поворот поляризации // Квантовая электроника. 2022. Т. 52. № 1. С. 91–96. EDN: QAFWCU.
5. Конышев В. А., Лукиных С. Н., Наний О. Е. и др. Влияние магнитного поля на поляризацию света в оптическом волокне со случайным распределением линейного двулучепреломления // Квантовая электроника. 2019. Т. 49. № 8. С. 773–778.
6. Рекомендация ITU-T G.652 (11/2016). Characteristics of a single-mode optical fibre and cable. Geneva: ITU, 2016.
7. Соколов С. А. Воздействие внешних электромагнитных полей на оптические кабели связи и гибридные линии. М.: Горячая линия – Телеком, 2018. 214 с.
8. Белова О. С., Болотов Д. В., Бушуев Э. Ю. и др. Влияние атмосферных разрядов на скорость генерации криптографического ключа в системах квантовой коммуникации // Оптический журнал. 2025. Т. 92. № 1. С. 13–20. DOI: 10.17586/1023-5086-2025-92-01-13-20.
9. Agrawal G. P. Nonlinear Fiber Optics. 5th ed. Academic Press, 2013. 648 p.
10. IEC 61312-1:1995. Protection against lightning electromagnetic impulse. Part 1: General principles. Geneva: IEC, 1995.
11. Колесников О. В. Особенности грозовых воздействий, влияющих на оптические кабели: учебное пособие для вузов. М.: Горячая линия – Телеком, 2024. 123 с.

DYNAMIC DIFFERENTIAL GROUP DELAY IN AN OPTICAL CABLE UNDER LIGHTNING STRIKE

Kolesnikov O.

Moscow Technical University of Communications and Informatics

The mechanism of dynamic differential group delay DGD_{dyn} in the optical fiber of a single-mode cable under a direct lightning strike is considered. It is shown that at a current rise rate $dI/dt = 10\text{--}50\text{ kA}/\mu\text{s}$, the polarization state variation rate reaches $105\text{--}106\text{ rad/s}$, and the total DGD in a 50-km ITU-T G.652 cable exceeds 100 ps and violates the $QBER < 11\%$ condition for the BB84 protocol at $R < 100\text{ m}$. An analytical expression relating DGD_{dyn} to the lightning current rise rate and the fiber anisotropy parameters is obtained.

Key words: fiber-optic line, lightning strike, polarization, Faraday effect, differential group delay, QBER, BB84, PMD

УДК 534.76
ГРНТИ 29.37.39**МЕТОДЫ ФОРМИРОВАНИЯ ПЕРЕДАТОЧНОЙ ФУНКЦИИ
ГОЛОВЫ****Е. С. Константинов, С. Л. Фёдоров**

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Передаточная функция головы – это математическая модель, описывающая изменения сигнала на его пути от источника звука до барабанной перепонки слушателя. Она играет ключевую роль в создании иммерсивного звучания при бинауральном воспроизведении контента посредством головных телефонов. Передаточные функции могут быть измерены непосредственно для конкретного слушателя или с использованием акустических манекенов, но данный процесс занимает продолжительное время ввиду большого числа необходимых измерений, а их результат определяется индивидуальными особенностями формы головы, геометрии ушных раковин и анатомического строения. Для корректировки данных особенностей и упрощения процесса формирования передаточных функций разработано множество методов их создания на основе существующих измерений или посредством компьютерного моделирования. В данной работе представлен краткий обзор наиболее распространенных подходов к формированию и адаптации передаточных функций головы.

цифровая обработка сигналов, передачная функция головы, измерение передаточной функции головы, моделирование передаточной функции головы, персонализация передаточной функции головы, антропометрический подход, морфологический подход, интерполяция передаточной функции головы

Математическая модель, описывающая акустический путь от источника звука до уха слушателя, может быть представлена передаточной функцией головы (ПФГ) в частотной области и импульсной характеристикой головы (ИХГ) во временной. Таким образом, для каждого конкретного положения источника существуют две ПФГ: для левого и правого уха, соответственно. Они являются уникальными, поскольку они определяются отражением звуковых волн от верхней части тела, формой головы, геометрией ушных раковин и пропорциями торса. ПФГ в том числе учитывают различия в сигналах, воспринимаемых левым и правым ухом, на основе которых слуховая система человека определяет направление на источник и расстояние до него: интерауральную (межушную) разницу времени прихода (ITD) и разницу уровней (ILD), а также характерные спектральные изменения [1].

Свойства данных функций позволяют применять их при разработке систем пространственного и иммерсивного звучания посредством фильтрации

сигнала источника с помощью соответствующих ПФГ – выполнения бинаурального синтеза. При последующем воспроизведении полученной пары сигналов с использованием головных телефонов слушатель воспринимает сигнал как исходящий из соответствующего положения источника в окружающем пространстве.

На текущий момент было проведено большое количество исследований эффективности отдельных ПФГ при их применении в подобных системах. Считается, что специально измеренные передаточные функции обеспечивают наиболее точное восприятие иммерсивного аудиоконтента. Кроме того, исследования показали, что использование обобщенных (усредненных) функций часто приводит к нечеткой локализации предполагаемого источника звука [2]. Использование неиндивидуальных ПФГ также может приводить к неестественной окраске звука и другим артефактам [3]. В других же исследованиях подтверждается улучшение способности к локализации источника при задействовании индивидуальных (персонализированных) ПФГ [4], но отмечается, что они не всегда являются предпочтительными из-за сложностей, возникающих в процессе их измерения [5]. Также была оценена роль смещения головы в ходе проведения измерений: наклон головы вверх или вниз оказывает существенно большее влияние, нежели наклон или поворот влево или вправо, вплоть до разницы в спектральных составляющих около 6 дБ [6]. Для решения данной проблемы существует возможность использования приспособлений для поддержания головы слушателя или определения ее ориентации в ходе измерений посредством системы слежения [7].

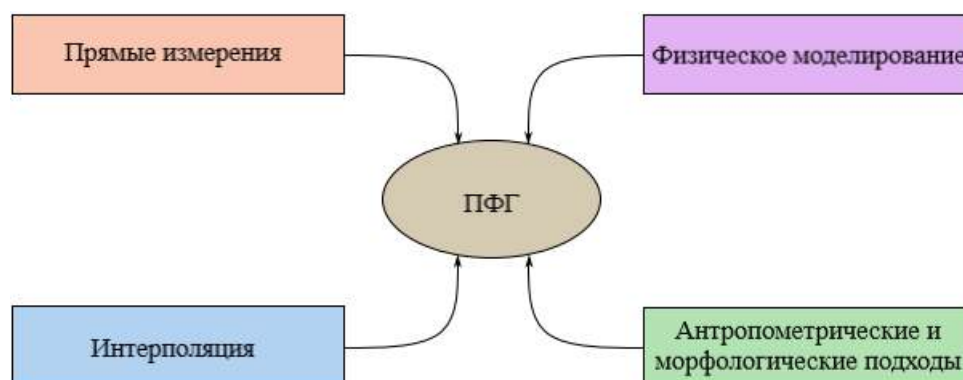


Рис. 1. Варианты формирования передаточных функций головы

Учитывая все вышеупомянутое, очевидно, что ПФГ играют важную роль в создании трехмерных звуковых сцен и требуют учета ряда факторов. В зависимости от набора исходных данных, вычислительных мощностей и временных ограничений могут использоваться различные способы их

формирования. На рисунке 1 представлены основные из них, включая дополнительные возможности по адаптации и персонализации.

Наиболее изученным способом получения ПФГ является непосредственное измерение в условиях безэховой камеры. Для этого могут использоваться бинауральные манекены стандартных размеров, имитирующие как исключительно голову, так и верхнюю часть торса слушателя [8]. Подобные измерения позволяют исследовать общие характеристики передаточных функций и их зависимость от условий измерений [9]. Однако данный подход не учитывает характерные индивидуальные отличия ПФГ, которые могут быть получены при измерении с использованием реальных слушателей [10]. Выделяют две основные группы методов измерения передаточных функций: посредством деконволюции и с помощью систем адаптивной фильтрации [11]. Наиболее распространенными являются первые методы, которые, в свою очередь, могут быть классифицированы в зависимости от типа используемого сигнала: псевдослучайной последовательности [12] или скользящего тона [13]. Псевдослучайные последовательности включают в себя последовательности максимальной длины (MLS), инвертированные повторяющиеся последовательности (IRS) и коды Голея. В качестве испытательных сигналов второго типа рассматриваются экспоненциальные и логарифмические скользящие тоны, а также сигналы суммы нескольких тонов [14]. Что касается адаптивной фильтрации, для определения коэффициентов фильтра обычно используется алгоритм адаптации с помощью метода наименьших квадратов (NLMS) [11,15]. При этом в ходе измерения могут оказывать влияние нелинейные искажения элементов системы, фоновый шум, звуковые отражения, контрольные устройства воспроизведения и условия окружающей среды (температура и др.).

Для получения ПФГ путем физического моделирования необходимо математическое описание физического процесса распространения и рассеяния звуковой волны твердым телом (головой и торсом человека) в условиях свободного поля. Оно может быть представлено волновым уравнением с подходящими граничными условиями, что позволяет сформировать передаточную функцию посредством численного решения определенной математической задачи во временной или частотной области. Так наиболее популярным подходом к моделированию задач рассеяния в акустике является метод граничных элементов (МГЭ, BEM) [16,17].

Численная реализация данного метода и других подходов к решению волнового уравнения поддерживается различным программным обеспечением (ПО). Из проприетарного можно выделить акустический модуль COMSOL Multiphysics, FastBEMAcoustic, подходящий для параллельных

вычислений, и Ansys. Также в доступе имеется ПО с открытым исходным кодом – Mesh2HRTF с ядром BEM NumCalc. В [18] представлен обзор численных методов, лежащих в его основе, а также практические рекомендации по реализации эффективного моделирования. Другим инструментом для решения граничных задач в однородных средах является BEM++ – библиотека C++ для использования с Python. Важно также отметить, что подобное моделирование требует значительных вычислительных мощностей, особенно на высоких частотах, поскольку более короткие длины волн требуют большего числа расчетных элементов.

Наряду с физическим моделированием, существуют также антропометрические и морфологические подходы к формированию ПФГ. Они основаны на взаимосвязи передаточной функции и особенностей строения человеческого тела: анатомии торса, головы и ушных раковин. Наиболее ранние исследования персонализации ПФГ на основе антропометрических данных опирались на базу данных CIPIC, содержащую измерения 45 человек по 37 антропометрическим параметрам с соответствующими передаточными функциями. В частности, 17 из представленных параметров, влияющих на слуховое восприятие человека, относятся к верхней части тела, а 10 – к каждому уху. За прошедшие годы были разработаны различные подходы, использующие все параметры или их подмножество, они различаются по сложности, но все направлены на нахождение компромисса между точностью и вычислительной эффективностью.

Метод сопоставления основывается на подборе ПФГ из имеющейся базы данных на основе определения минимального различия антропометрических показателей. Так, в [19] была рассмотрена модель, использующая трехмерные полигональные сетки, полученные на основе геометрии ушных раковин. В качестве вводных данных аналогичных методов могут использоваться результаты анализа анатомического строения слухового аппарата нейронными сетями по двумерным или трехмерным снимкам. На основе такого анализа наиболее подходящие ПФГ из имеющейся базы данных могут быть не только подобраны, но и скорректированы для конкретного человека.

Для обеспечения плавного и непрерывного перемещения источника в ходе прослушивания для известных ПФГ дополнительно задействуются методы интерполяции, что особенно актуально для малых баз данных с ограниченным пространственным разрешением. Они могут быть разделены на три основные категории: методы ближайшего соседа, функциональных моделей и на основе нейронных сетей. Первые из них включают линейную интерполяцию, билинейную интерполяцию, тетраэдральную ин-

терполяцию, векторное амплитудное панорамирование (VBAP) и метод обратных взвешенных расстояний (IDW). Вторые – системы задержки и фильтрации, метод главных компонент и разложение на сферические гармоники. Последние включают использование генеративно-состязательных, сверточных нейронных и сферических моделей сетей [20].

Из-за существенных различий в анатомии людей создание и адаптация ПФГ для точной локализации источников и персонализированного трехмерного воспроизведения аудиоконтента остается серьезной исследовательской задачей. В данной статье были рассмотрены методы формирования передаточных функций, начиная с непосредственных измерений. Этот подход на текущий момент является наиболее точным и предпочтительным способом получения персонализированной передаточной функции головы и может быть реализован с использованием различных испытательных сигналов. Однако он требует физического присутствия слушателя для проведения измерений, наличия лаборатории (безэховой камеры), профессионального оборудования, а также существенных временных и трудовых затрат для получения базы данных с высоким пространственным разрешением.

В качестве альтернативы, не требующей специальных условий и оборудования для проведения измерений, может быть рассмотрено физическое моделирование, основанное на решении волнового уравнения. В данном случае наиболее распространенным является подход, основанный на методе граничных элементов. Несмотря на отсутствие необходимости в существенных временных и материальных затратах, он все же требует значительных вычислительных мощностей для выполнения вычислений на верхних частотах слышимого диапазона, что связано с существенным увеличением расчетных элементов. Помимо этого, стремление к получению более точных передаточных функций головы сопряжено с ростом трудовых затрат, связанных с подготовкой модели, учитывающей анатомические особенности конкретного человека. Вместе с тем точность полученных функций все же оказывается недостаточно точной, что негативно сказывается на качестве восприятия звукового материала и обуславливает преимущественное использование данного подхода для формирования обобщенных передаточных функций.

Персонализированные ПФГ могут также быть получены с использованием антропометрических и морфологических подходов. Для этого требуется определение и измерение соответствующих параметров и последующее сопоставление или адаптация передаточных функций из уже имеющейся базы данных. Данные подходы представляются наиболее перспективными при наличии базы данных точно измеренных передаточ-

ных функций, особенно при выполнении анализа антропометрических показателей с использованием нейронных сетей. Так возможность нахождения компромисса между точностью итоговой функции и ограничениями вычислительных мощностей представляет существенный интерес на текущий момент. Различные же методы интерполяции позволяют вычислить передаточные функции для позиций источников, отсутствующих в исходном наборе, и обеспечить плавность при их перемещении, но не представляют интереса с точки зрения персонализации.

Таким образом, на данный момент наиболее перспективными можно считать антропометрические и морфологические подходы ввиду гибкости их реализации, а данный обзор может служить справочным материалом для дальнейших исследований в данной области.

Список используемых источников

1. Iida K. Head-Related Transfer Function and Acoustic Virtual Reality. Singapore: Springer, 2019. DOI: 10.1007/978-981-13-9745-5.
2. Majdak P., Masiero B., Fels J. Sound localization in individualized and non-individualized crosstalk cancellation systems // Journal of Acoustical Society of America. 2013. Vol. 133. Pp. 2055–2068. DOI: 10.1121/1.4792355.
3. Garas J. Adaptive 3D Sound Systems // Springer Science & Business Media: Berlin, Germany. 2012. Vol. 566.
4. Armstrong C., Thresh L., Murphy D., Kearney G. A perceptual evaluation of individual and non-individual HRTFs: A case study of the SADIE II database // Applied Sciences. 2018. Vol. 8. P. 2029. DOI: 10.3390/app8112029.
5. Usher J., Martens W. L. Perceived naturalness of speech sounds presented using personalized versus non-personalized HRTFs // In Proceedings of the International Conference on Auditory Display (ICAD), Montreal, QC, Canada, 26–29 June 2007; Georgia Institute of Technology: Atlanta, GA, USA.
6. Hirahara T., Sagara H., Toshima I., Otani M. Head movement during head-related transfer function measurements // Acoustical Science and Technology. 2010. Vol. 31. PP. 165–171. DOI: 10.1250/ast.31.165.
7. Carpentier T., Bahu H., Noisternig M., Warusfel O. Measurement of a head-related transfer function database with high spatial resolution // In Proceedings of the 7th Forum Acusticum (EAA), Krakow, Poland, 7–12 September 2014.
8. Gardner B., Martin K. HRTF measurements of a KEMAR dummy-head microphone // MIT Media Lab Perceptual Computing Technical Report 280. 1994. URL: <https://sound.media.mit.edu/resources/KEMAR.html> (дата обращения: 28.04.2026).
9. Li Y., Preihs S., Peissig J. Acquisition of continuous-distance near-field head-related transfer functions on KEMAR using adaptive filtering // In Proceedings of the 152nd Audio Engineering Society Convention, Hague, The Netherlands, 7–8 May 2022.
10. Yu G., Wu R., Liu Y., Xie, B. Near-field head-related transfer-function measurement and Database of human subjects // Journal of Acoustical Society of America. 2018. Vol. 143. PP. 194–198. DOI: 10.1121/1.5027019.
11. Li S., Peissig J. Measurement of head-related transfer functions: A review // Applied Sciences. 2020. Vol. 10. P. 5014. DOI: 10.3390/app10145014.

12. Ye Q., Dong Q., Zhang Y., Li, X. Fast head-related transfer function measurement in complex environments // In Proceedings of the 20th International Congress on Acoustics, Sydney, Australia, 23–27 August 2010. PP. 23–27.
13. Rothbucher M., Veprek K., Paukner P., Habigt T., Diepold, K. Comparison of head-related impulse response measurement approaches // Journal of Acoustical Society of America. 2013. Vol. 134. PP. 223–229. DOI: 10.1121/1.4813592.
14. Pulkki V., Laitinen M.V., Sivonen V. HRTF measurements with a continuously moving loudspeaker and swept sines // In Proceedings of the 128th Audio Engineering Society Convention, London, UK, 22–25 May 2010.
15. Correa C. K., Li S., Peissig J. Analysis and comparison of different adaptive filtering algorithms for fast continuous HRTF measurement // In Proceedings of the Tagungsband Fortschritte der Akustik–DAGA, Kiel, Germany, 6–9 March 2017. Pp. 6–9.
16. Kirkup S. The boundary element method in acoustics: A survey // Applied Sciences. 2019. Vol. 9. P. 1642. DOI: 10.3390/app9081642.
17. Bai M. R., Ih J. G., Benesty, J. Acoustic Array Systems: Theory, Implementation, and Application. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2013. DOI: 10.1002/9780470827253.
18. Kreuzer W., Pollack K., Brinkmann F., Majdak P. NumCalc: An open-source BEM code for solving acoustic scattering problems // Engineering Analysis with Boundary Elements. 2024. Vol. 161. PP. 157–178. DOI: 10.1016/j.enganabound.2024.01.008.
19. Warnecke M., Jamison S., Prepelita S., Calamia P., Ithapu V. K. HRTF personalization based on ear morphology // In Proceedings of the Audio Engineering Society Conference: Audio for Virtual and Augmented Reality, Redmond, WV, USA, 15–17 August 2022.
20. Jiang Z., Sang J., Zheng C., Li A., Li X. Modeling individual head-related transfer functions from sparse measurements using a convolutional neural network // Journal of Acoustical Society of America. 2023. Vol. 153. PP. 248–259. DOI: 10.1121/10.0016854.

HRTF GENERATION METHODS REVIEW

Konstantinov E., Fedorov S.

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

A head-related transfer function can be defined as a mathematical model describing an acoustic path between a sound source and a listener's eardrum. It plays a crucial role in creating immersive audio experiences through headphones using binaural synthesis techniques. Head-related transfer functions can be measured directly for a certain real subject or an acoustic mannequin, yet measurement process is time-consuming due to a significant number of source positions. Furthermore, individual differences in head shape, pinnae geometry and torso dimensions also define the result. To address these challenges, numerous methods have been developed to generate new head-related transfer functions from existing data or through computer simulations. This paper provides a brief overview of the current approaches for generation and adaptation of these functions.

Key words: digital signal processing, head-related transfer function (HRTF), HRTF measurement, HRTF modelling, HRTF personalization, HRTF anthropometric and morphological approaches, HRTF interpolation

УДК 004.056.55
ГРНТИ 28.21.19**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СПОСОБА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ
НАРУШИТЕЛЕМ В ПРОТОКОЛЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КЛЮЧА
ПО ОТКРЫТЫМ БЕСШУМНЫМ КАНАЛАМ****В. И. Коржик, А. С. Лапшин, В. А. Яковлев**

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Исследуется математический базис построения протоколов распределения ключей по бесшумным каналам на основе добавления искусственного зашумления легальными пользователями. Проводится сравнительный анализ числовой (скалярной) и матричной реализаций протокола преимущественного улучшения основного канала (ПУОК-с). Доказано, что в числовом протоколе пассивный нарушитель имеет возможность применения оптимизированного алгоритма обработки, квадратично снижающего дисперсию помехи второго порядка, что исключает возможность обеспечения безопасности. Обоснован переход к матричным структурам как к методу принуждения нарушителя к подоптимальному алгоритму приема.

распределение ключей, искусственное зашумление, матричный протокол, дисперсия помех, пассивный нарушитель

Обеспечение конфиденциального распределения криптографических ключей по открытым каналам связи без использования классических вычислительно сложных допущений является актуальной задачей современной прикладной криптографии [1]. Одним из перспективных направлений в данной области является построение протоколов с использованием искусственного (синтетического) зашумления, инициируемого самими легитимными пользователями [2]. В рамках данного подхода безопасность трансляции битов сырого ключа базируется на создании искусственного статистического преимущества основного канала связи (между Алисой и Бобом) над отводным каналом перехвата (каналом Евы).

Традиционно в качестве базовых элементов для обмена случайными величинами рассматривались как простейшие числовые (скалярные) значения, так и многомерные структуры (векторы и матрицы) [3, 4]. Однако, как показано в ряде недавних исследований, упрощенные скалярные протоколы формирования битов сырого ключа (ФСК) часто характеризуются нулевой секретной емкостью в присутствии пассивного наблюдателя [5].

Настоящая работа посвящена строгому математическому обоснованию причин физической небезопасности числовых версий протоколов преиму-

ществленного улучшения основного канала (ПУОК-с) и доказательству необходимости использования многомерных матричных структур для нейтрализации оптимальных алгоритмов обработки перехваченной информации нарушителем.

Рассмотрим базовую числовую (скалярную) версию протокола формирования битов сырого ключа ПУОК-с со встроенным кодом повторения длиной S . Пусть легитимные пользователи обмениваются случайными вещественными числами p and q , распределенными по нормальному закону $\mathcal{N}(0,1)$. При этом в канале связи происходит искусственное зашумление независимыми аддитивными гауссовскими помехами $n_{A,i}$ и $n_{B,i}$ ($i = 1, \dots, S$) с нулевым математическим ожиданием и дисперсией σ^2 :

$$n_{A,i} \sim \mathcal{N}(0, \sigma^2), \quad n_{B,i} \sim \mathcal{N}(0, \sigma^2).$$

В процессе обмена пассивный наблюдатель Ева перехватывает два массива зашумленных значений:

$$\{\tilde{p}_i = p + n_{A,i}\}_{i=1}^S \text{ и } \{\tilde{q}_i = q + n_{B,i}\}_{i=1}^S.$$

Для принятия решения о знаке передаваемого произведения $p \cdot q$ у нарушителя существуют два принципиально различных способа математической обработки перехваченных данных.

При использовании первого способа нарушитель сначала осуществляет линейное накопление и усреднение перехваченных сигналов по блоку длины S , подавляя дисперсию аддитивных помех:

$$\tilde{q} = \frac{1}{S} \sum_{i=1}^S \tilde{q}_i = q + \tilde{n}_B, \quad \tilde{p} = \frac{1}{S} \sum_{i=1}^S \tilde{p}_i = p + \tilde{n}_A$$

где дисперсии усредненных помех составляют:

$$D(\tilde{n}_B) = \frac{\sigma^2}{S}, \quad D(\tilde{n}_A) = \frac{\sigma^2}{S}$$

Окончательная решающая статистика u_1 формируется как произведение усредненных значений:

$$u_1 = \tilde{p} \cdot \tilde{q} = (p + \tilde{n}_A)(q + \tilde{n}_B) = pq + q\tilde{n}_A + p\tilde{n}_B + \tilde{n}_A\tilde{n}_B \quad (1)$$

Составляющая $\tilde{n}_A\tilde{n}_B$ представляет собой перекрестную помеху (шум первого типа) у нарушителя.

При применении второго способа нарушитель сначала перемножает пары перехваченных значений для каждого сеанса i , а затем усредняет

полученные произведения по всему блоку:

$$u_2 = \frac{1}{S} \sum_{i=1}^S \tilde{p}_i \tilde{q}_i = \frac{1}{S} \sum_{i=1}^S (p + n_{A,i}) (q + n_{B,i}).$$

Раскрыв скобки под знаком суммы и приведя подобные члены, получим выражение для решающей статистики

$$u_2 = pq + q\tilde{n}_A + p\tilde{n}_B + \frac{1}{S} \sum_{i=1}^S n_{A,i} n_{B,i} \quad (2)$$

Член $\frac{1}{S} \sum_{i=1}^S n_{A,i} n_{B,i}$ представляет собой перекрестную помеху второго типа.

Для оценки эффективности стратегий нарушителя сравним дисперсии перекрестных помех первого и второго типов, входящих в уравнения решающих статистик (1) и (2).

Из теории вероятностей известно, что дисперсия произведения двух независимых случайных величин X и Y , характеризующихся математическими ожиданиями m_x , m_y и дисперсиями σ_x^2 и σ_y^2 , определяется выражением: (3)

$$D(X \cdot Y) = \sigma_x^2 \cdot \sigma_y^2 + m_x^2 \cdot \sigma_y^2 + m_y^2 \cdot \sigma_x^2 \quad (3)$$

Поскольку в рассматриваемом протоколе все шумовые составляющие являются центрированными ($m_x = m_y = 0$), а их дисперсии равны $\sigma_x^2 = \sigma_y^2 = \sigma^2$, выражение (3) упрощается до вида:

$$D(X \cdot Y) = D(X) \cdot D(Y) = \sigma^4. \quad (4)$$

На основе формулы (4) определим дисперсию перекрестной помехи первого типа (шум 1) для оптимизированного способа 1 обработки данных нарушителем:

$$D(\tilde{n}_A \cdot \tilde{n}_B) = D(\tilde{n}_A) \cdot D(\tilde{n}_B) = \frac{\sigma^2}{s} \cdot \frac{\sigma^2}{s} = \frac{\sigma^4}{s^2}. \quad (5)$$

Далее определим дисперсию перекрестной помехи второго типа (шум 2) для способа 2 обработки данных:

$$D\left(\frac{1}{S} \sum_{i=1}^S n_{A,i} \cdot n_{B,i}\right) = \frac{1}{S^2} \sum_{i=1}^S D(n_{A,i} \cdot n_{B,i}) = \frac{1}{S^2} \cdot S \cdot \sigma^4 = \frac{\sigma^4}{S}. \quad (6)$$

Сопоставляя полученные выражения (5) и (6), получаем строгое неравенство:

$$D(\tilde{n}_A \cdot \tilde{n}_B) < D\left(\frac{1}{s} \sum_{i=1}^s n_{A,i} \cdot n_{B,i}\right), \quad (7)$$

так как $\frac{\sigma^4}{s^2} < \frac{\sigma^4}{s}$ при $s > 1$.

Из неравенства (7) следует, что при первом способе обработки (перемножении предварительно усредненных сигналов) дисперсия перекрестной помехи у нарушителя оказывается в s раз меньше, чем при втором способе (усреднении произведений).

Поскольку пассивный наблюдатель Ева стремится минимизировать собственную ошибку декодирования P_e , она гарантированно будет использовать способ 1. В этих условиях из-за квадратичного подавления шума нарушителем легитимные пользователи принципиально неспособны обеспечить выполнение условия безопасности $P_m < P_e$ ни при каких параметрах системы. Таким образом, скалярный числовой протокол ПУОК-с является небезопасным.

Для обеспечения безопасности распределения ключей необходимо лишить нарушителя возможности использовать оптимальный способ 1 обработки данных (перемножение средних) и принудить его к использованию подоптимального способа 2, характеризующегося линейным затуханием дисперсии помех $O\left(\frac{1}{s}\right)$.

Эффективным решением данной задачи является переход от числовых (скалярных) величин к многомерным матричным структурам размерности $n \times n$ и использование нелинейных матричных операторов.

Пусть вместо скаляров пользователи обмениваются случайными гауссовскими матрицами P и Q , а в качестве функции формирования бита ключа используется нелинейное отображение $f(\cdot)$ (например, вычисление собственных значений матриц или нелинейное квантование элементов диагонали).

В силу математических свойств нелинейных операторов, для них не выполняется свойство дистрибутивности относительно сложения:

$$f(P + \tilde{n}_A) \neq f(P) + f(\tilde{n}_A). \quad (8)$$

Если пассивный нарушитель попытается применить способ 1 (предварительно усреднить перехваченные матрицы для подавления шума, а затем вычислить нелинейную функцию от их произведения), это приведет к разрушению полезной корреляционной связи между исходными матрицами P

и Q . В результате нарушитель не сможет сформировать корректное решающее правило.

Таким образом, многомерная матричная структура протокола ПУОК-с математически вынуждает нарушителя отказаться от способа 1 и использовать исключительно способ 2 обработки перехваченных данных (вычисление нелинейных признаков для каждой зашумленной пары матриц в отдельности с последующим усреднением). Поскольку дисперсия помех второго порядка для способа 2 затухает медленнее ($O\left(\frac{1}{s}\right)$), уровень шума в канале перехвата остается высоким. Это обеспечивает устойчивое выполнение критерия безопасности $P_m < P_e$ во всем диапазоне практически реализуемых параметров системы.

В настоящей работе приведено строгое математическое обоснование необходимости использования многомерных матричных структур в протоколах распределения криптографических ключей по открытым бесшумным каналам связи с обратной связью.

На основе сравнительного анализа двух стратегий пассивного нарушителя доказано, что в случае использования числовых (скалярных) величин нарушитель имеет принципиальную возможность применения оптимального алгоритма обработки данных (перемножения средних значений). Данный алгоритм обеспечивает квадратично быстрое затухание дисперсии перекрестных помех со скоростью $O\left(\frac{1}{s^2}\right)$, что полностью нивелирует преимущество легитимных пользователей и делает секретную емкость канала равной нулю.

Обосновано, что переход к многомерным матричным структурам размерности $n \times n$ с применением нелинейных операторов (вычисление следа произведения, собственных значений и др.) лишает нарушителя возможности предварительного усреднения сигналов из-за потери свойства дистрибутивности. Нарушитель математически вынуждается к использованию подоптимального алгоритма обработки (усреднения произведений), при котором дисперсия помех затухает лишь линейно ($O\left(\frac{1}{s}\right)$). Это позволяет сохранить высокий уровень зашумления в канале перехвата и гарантирует устойчивое выполнение условия безопасности $P_m < P_e$.

Полученные теоретические результаты позволяют строго обосновать архитектуру перспективных систем бесключевого распределения ключей

и открывают направления для оптимизации параметров матричных протоколов с целью достижения максимальной секретной емкости.

Список используемых источников

1. Wyner A. D. The Wire-Tap Channel // Bell System Technical Journal. 1975. Vol. 54. N 8. PP. 1355-1387.
2. Maurer U. M. Secret key agreement by public discussion from common information // IEEE Transactions on Information Theory. 1993. Vol. 39. N 3. PP. 733-742.
3. Korzhik V., Starostin V., Yakovlev V., Kabardov M., Gerasimovich A., Zhuvikin A. Information Theoretically Secure Key Sharing Protocol Executing with Constant Noiseless Public Channels // Mathematical problems of cryptography. 2021. Vol. 12. N 3. PP. 31-47.
4. Yakovlev V., Korzhik V., Starostin V., Lapshin A., Zhuvikin A. Channel Traffic Minimizing Key Sharing Protocol Intended for the Use over the Internet... // Proceedings of the 32nd Conference of Open Innovations Association FRUCT. 2023. PP. 374–379.
5. Korzhik V., Yakovlev V., Starostin V., Lapshin A., Zhuvikin A. Vulnerability of the Key Sharing Protocol Executing over the Noiseless Public Channels with Feedback // Conference of Open Innovations Association, FRUCT. 2024. N 35. PP. 374-379.

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF THE EAVESDROPPER'S DATA PROCESSING METHOD IN THE KEY DISTRIBUTION PROTOCOL OVER OPEN NOISELESS CHANNELS

Korzhik V., Lapshin A., Yakovlev V.

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

This paper investigates the mathematical basis for constructing key distribution protocols over noiseless channels based on the introduction of artificial noise by legitimate users. A comparative analysis is conducted between the numerical (scalar) and matrix implementations of the protocol for advantageous improvement of the main channel (AIMC-s). It is demonstrated that in the numerical protocol, a passive eavesdropper has the opportunity to apply an optimized processing algorithm that quadratically reduces the variance of the second-order noise, which eliminates the possibility of ensuring security. The transition to matrix structures is justified as a method of forcing the adversary to use a suboptimal reception algorithm.

Key words: key distribution, artificial noise, matrix protocol, noise variance, passive eavesdropper

УДК 004.415.53

ГРНТИ 20.01.15

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ТЕСТИРОВАНИЯ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ В ОРГАНИЗАЦИЯХ

В. А. Корзун, О. И. Пантюхин

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В статье рассмотрены методы тестирования, выявление организационных барьеров, анализ влияния автоматизации на качество и оптимизация с кейсами внедрения в рамках тестирования программного обеспечения. Предложен вариант по интеграции искусственного интеллекта в рамках тестирования программного обеспечения, а также повышение компетенций для специалистов в рамках освоения инструментов тестирования и платформ на базе искусственного интеллекта для анализа кода

инфотелекоммуникационные сети, искусственный интеллект, программное обеспечение, методы тестирования, технологии фреймворков автоматизации тестирования

В эпоху цифровизации большинство организаций сталкиваются с вызовами обеспечения надежности программного обеспечения (далее – ПО), где традиционные тесты отстают от темпов разработки. Актуальность исследования обусловлена необходимостью импортозамещения программного обеспечения, расширением применения автоматизированного тестирования и использованием технологий искусственного интеллекта при проверке программного кода как для виртуальных исполнений продукта, так и для аппаратных платформ, включающих программное обеспечение, поставляемое вендором [1].

Методы тестирования ПО делят по уровням: модульное проверяет отдельные компоненты на соответствие спецификациям, интеграционное – взаимодействие модулей, системное охватывает весь продукт в целом, приемочное имитирует эксплуатацию заказчиком. По подходу различают тестирование черного ящика, где фокус на входах-выходах без кода, белого – с анализом внутренней логики, серого – комбинацию. Динамические методы запускают программу в реальном времени, статические анализируют код без выполнения. В организациях ручное тестирование подходит для исследовательских задач, как поиск уязвимостей

в интерфейсах, автоматизированное для регрессии в CI/CD-пайплайнах, где, например, скрипты на Selenium ускоряют циклы. Современные гибриды интегрируют ИИ для генерации тестовых сценариев в платформах вроде Testim.

Традиционные методы тестирования, такие как ручное, по типу «черного» и «белого» ящика, черпают силу в своей простоте и интуитивности. Они не требуют дорогих инструментов, позволяя специалистам быстро погружаться в логику кода или интерфейса, выявляя нюансы usability (удобства использования), которые автоматика упускает. В небольших командах, например, при разработке локального ПО для диспетчерских систем, которым присуще однообразие по функционалу и требованиям, такой подход ускоряет итерации без лишних вложений. Однако ручной труд быстро накапливает усталость, приводя к пропускам повторяющихся дефектов. В масштабных проектах, вроде создания аппаратной платформы с целью защиты передаваемых данных, процесс растягивается на недели, повышая риски задержек. Субъективность оценок усложняет стандартизацию, а отсутствие параллелизма тормозит регрессионные проверки, особенно в средах с высокой нагрузкой.

Существующие подходы к тестированию ПО в организациях натываются на узкие места, особенно в динамичных проектах. Ручные проверки, популярные в средних фирмах, занимают недели на циклы, а команды тестирования пропускают тонкие баги из-за усталости или спешки, взять те же интерфейсы с переменным поведением. Автоматизированные фреймворки вроде Selenium справляются с базовыми сценариями, но рушатся при редизайне, требуя выделения большого количества часов на правки от разработчиков. В компаниях без зрелого DevOps, это приводит к разрывам: QA-отделы тестируют изолированно, игнорируя интеграцию с продукто-окружением. Безопасность хромает, статические анализаторы не ловят runtime-уязвимости, как в случаях с вредоносным кодом в IoT-сетях. Российские IT-фирмы при импортозамещении усугубляют проблему дефицитом адаптированных инструментов, где тесты не масштабируются под локальные стеки [1].

В большинстве организаций качество тестирования ПО определяется не только техниками, но и внутренней средой. Жесткая иерархия тормозит обмен данными между разработчиками и тестерами, провоцируя накопление ошибок на поздних этапах. В распределенных командах, распространенных в российских IT-компаниях, разница во времени и слабая интегра-

ция инструментов коммуникации размывают ответственность, снижая охват сценариев.

Ограниченный бюджет вынуждает организации отказываться от части коммерческих фреймворков автоматизации, сохраняя значительную долю ручного тестирования. В условиях перехода на отечественное программное обеспечение нередко возникает дефицит готовых библиотек, инструментов и тестовых сценариев, что увеличивает продолжительность подготовки и проведения испытаний [1]. Существенное влияние оказывает организационная культура предприятия. Стремление сократить сроки выпуска новых версий нередко приводит к уменьшению объема тестирования, что отрицательно отражается на надежности программного продукта. Дополнительным фактором риска остается недостаточный уровень подготовки специалистов, особенно при разработке высоконагруженных систем обработки данных и средств информационной безопасности. Повысить эффективность процесса позволяет автоматизация повторяющихся операций с использованием Selenium, Robot Framework и аналогичных средств. Современные технологии искусственного интеллекта расширяют возможности автоматизированного тестирования за счет анализа накопленных данных о дефектах, формирования тестовых сценариев и выявления нетипичного поведения программных компонентов. В условиях импортозамещения подобные решения могут эффективно применяться совместно с отечественными средствами анализа программного обеспечения, обеспечивая более высокое качество тестирования [1]. Практика показывает, что применение ChatGPT и других генеративных моделей искусственного интеллекта при создании тестовых сценариев и вспомогательных скриптов позволяет сократить продолжительность отдельных этапов тестирования и повысить полноту покрытия типовых сценариев [2].

Культура компании усиливает эффект, при фокусе на скорых релизах тесты урезают, рискуя стабильностью. Низкая квалификация из-за отсутствия тренингов усугубляет ситуацию, особенно в сферах с высокой нагрузкой, как системы сбора данных или безопасность.

Автоматизация рутинных проверок через фреймворки вроде Selenium или Robot Framework освобождает специалистов от монотонной работы, обеспечивая круглосуточное выполнение тестов на различных платформах. Добавление элементов ИИ усиливает этот подход: нейросетевые модели, обученные на исторических данных о дефектах, самостоятельно формируют сценарии нагрузки или выявляют аномалии в поведении системы в ре-

альном времени. В организациях, где акцент на импортозамещении, такие решения интегрируют с отечественными инструментами анализа, применяя, например, к виртуальным исполнениям продукта, где ИИ распознает паттерны ошибок. Практика показывает, что комбинация с ChatGPT для генерации скриптов сокращает цикл тестирования вдвое, особенно при разработке систем сбора данных или сетей Интернета вещей, где динамическое обнаружение угроз становится ключевым.

Внедрение принципов быстрой перенастройки, заимствованных из SMED, позволяет сократить время подготовки тестовых окружений в разы, особенно при частых итерациях релизов [3]. Адаптация чат-ботов вроде ChatGPT для генерации сценариев покрывает до 70 % рутинных кейсов, освобождая специалистов для сложных задач [2]. В проектах с виртуальным исполнением продукта и интеграцией ИИ в рамках тестирования, ИИ позволяет динамически анализировать уязвимости, предсказывая сбои заранее. Избыточность методов или дублирование проверок с кросс-верификацией, конечно, повышает устойчивость к ошибкам в ПО. Многофакторный анализ в сетях Интернета вещей оптимизирует выбор протоколов, минимизируя ложные срабатывания.

Организации внедряют корпоративные курсы по автоматизированному тестированию, где специалисты осваивают инструменты вроде Selenium и платформ на базе ИИ для анализа кода [4]. В российских компаниях акцент на импортозамещение: модули по отечественным аналогам фреймворков, с практическими заданиями по выявлению уязвимостей в реальном времени. Семинары с симуляциями вредоносного ПО или других внешних факторов, сочетают теорию и кейсы из практики, повышая навыки тестирования. Сертификация по ISTQB унифицирует подходы, ускоряя адаптацию к новым методам в будущих проектах.

Исследование показало, что традиционные методы тестирования программного обеспечения в организациях характеризуются высокой трудоемкостью и недостаточной адаптивностью к современным темпам разработки программных продуктов. Использование средств автоматизации, технологий искусственного интеллекта и систематическое повышение квалификации специалистов позволяют повысить эффективность процессов тестирования и качество выпускаемого программного обеспечения. Организациям целесообразно внедрять новые методы поэтапно: начиная с пилотных проектов для наиболее критичных модулей и постепенно распространяя успешные практики на остальные компоненты программного продукта с исполь-

зованием объективных метрик качества. Перспективы дальнейшего развития связаны не только с импортозамещением инструментов тестирования, но и с созданием конкурентоспособных отечественных программных продуктов, обладающих экспортным потенциалом, что соответствует современным тенденциям развития российского ИТ-сектора [5].

Список используемых источников

1. Блохин В. А., Вертоградов А. В. «Взрывное» импортозамещение на российском рынке программного обеспечения // Информационное общество. 2024. № 214. С. 56–69. DOI:10.47711/0868-6351-214-56-69.
2. Myrzakulova A. Approaches to Implementing ChatGPT in Software Test Automation // International Journal of Information and Communication Technologies. 2023. Vol. 14. N 2. PP. 7-15. DOI:10.54309/ijict.2023.14.2.007.
3. Ермолаева Е. В., Титоренко А. В. Совершенствование методов обеспечения безопасности при эксплуатации оборудования с применением SMED // Автоматизация. Современные технологии. 2025. № 1. С. 13-20. DOI:10.25712/astu.2072-8921.2025.01.013.
4. Хаитбаева З. А. Развитие открытого программного обеспечения в сфере Web // London Journal of Interdisciplinary Research. 2021. N 5. PP. 22-27. DOI:10.18411/lj-05-2021-22.
5. Белоусов А. В., Волков С. В. Потенциал экспорта отдельных видов программного обеспечения российских ИТ-компаний // Информационное общество. 2024. № 215. С. 96–112. DOI:10.47711/0868-6351-215-96-112.

PERFECTING SOFTWARE TESTING METHODS IN ORGANIZATIONS

Korzun V., Pantyukhin O.

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

The article examines testing methods, the identification of organizational barriers, the analysis of the impact of automation on quality, and optimization approaches with implementation case studies in software testing. It proposes an approach to integrating artificial intelligence into software testing, as well as enhancing the competencies of specialists through mastering testing tools and AI-based platforms for code analysis.

Key words: *infocommunication networks, artificial intelligence, software, testing methods, and test automation framework technologies*

УДК 004.732
ГРНТИ 49.33.29

УПРАВЛЕНИЕ ЗАДЕРЖКОЙ В СЕТЯХ WI-FI 6

В. Е. Коротин, А. А. Тихомиров

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Исследуется управление задержкой в сетях Wi-Fi 6. Для этого представлена существующая модель, позволяющая прогнозировать передачу пакетов данных. Данная модель прогнозирования передачи пакетов данных учитывает параметры физического и канального уровней модели взаимодействия открытых систем: выбор нумерологии мультиплексирования с ортогональным частотным разделением каналов, модуляционно-кодированных схем и параметров доступа к среде. Модель позволяет определять задержку в реальном времени.

беспроводные локальные сети, Wi-Fi 6, задержка, IMT-2030, MATLAB

К 2030 году ожидается массовое внедрение различных приложений: промышленный интернет вещей, тактильный интернет, дополненная и виртуальная реальность, высокоавтоматизированные транспортные средства. В связи с этим возникает потребность в приложениях и сценариях, которые отражены в IMT-2030, часть из которых связана с обеспечением малой задержки [1, 2].

С другой стороны, в ряде сценариев может быть уместно рассмотреть использование систем беспроводных локальных сетей – 802.11ax, или Wi-Fi 6, поэтому следует обратить внимание на исследование того, какие задержки могут быть обеспечены технологией Wi-Fi 6. Как следствие, необходимо выяснить, что влияет на формирование задержек Wi-Fi 6. Для решения данной задачи предлагается осуществить математическое моделирование в среде MATLAB. Для этого будет представлена существующая модель среды MATLAB, являющаяся симуляцией системы многоузлового жилого сценария [3].

Реализация существующей модели среды MATLAB представлена на рисунке 1. Данная модель является результатом симуляции в среде MATLAB, которая представляет собой жилой дом с реализацией технологии Wi-Fi 6. Жилой дом состоит из 3 этажей, на каждом этаже по 4 комнаты, в каждой комнате одна точка доступа и 2 приемные станции. Затухание сигнала рассчитывается в зависимости от расстояния между узлами и количества преград (стен и перекрытий).

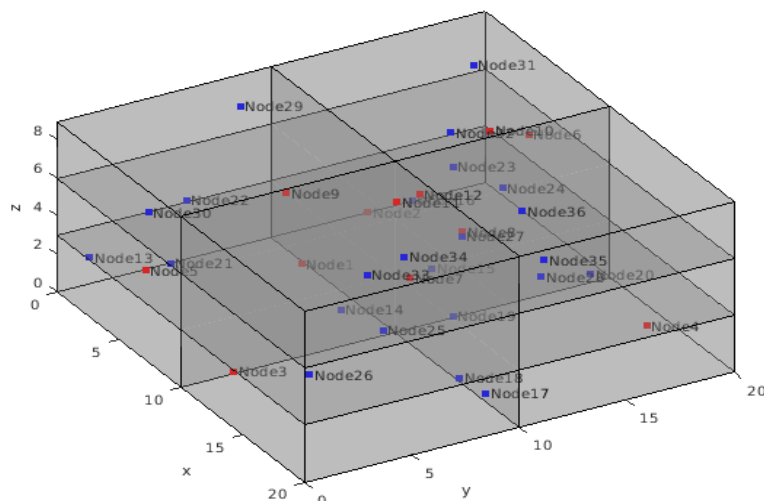


Рис. 1. Условия, для которых разработана модель MATLAB реализации Wi-Fi 6

После настройки параметров создаются объекты узлов сети с заданными физическими и канальными уровнями модели OSI. Затем инициализируется симулятор `hWirelessNetworkSimulator`, который запускает работу всех узлов на заданное время. Во время симуляции производится передачи пакетов данных от передающих станций (AP) приемным станциям (STA).

На физическом уровне реализован сценарий абстракции физического уровня. Цель абстракции физического уровня – точное прогнозирование результатов моделирования. Основной принцип заключается в вычислении эффективного среднего SINR в заданном OFDM-символе. Эта величина затем служит связующим звеном между количеством потерь пакетов (PER) в аддитивном белом гауссовом шуме (AWGN) и количеством потерь пакетов (PER) в многолучевом канале для заданного типа кодирования, размера пакета и значения MCS [4]. Физический уровень представлен на рисунке 2.

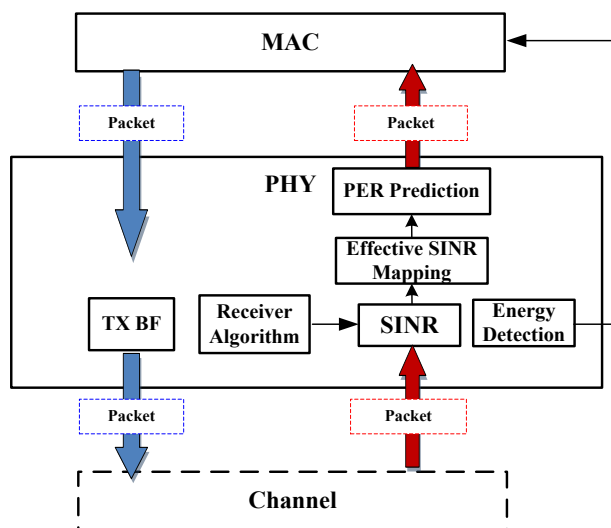


Рис. 2. Физический уровень модели MATLAB

На данном уровне можно варьировать следующие параметры: формат пакета, полосу пропускания канала, индекс модуляционно-кодирующей схемы, мощность и усиление передатчика. Также на данном уровне могут быть реализована технология MU-MIMO, может моделироваться функция потерь, которая зависит от количества стен, количества этажей и расстояния между узлами. Модель потерь создается с помощью функции `hTGaxResidentialPathLoss`.

На канальном уровне (MAC) реализованы технологии EDCA, агрегации, передачи и приема управляющих кадров (RTS/CTS/ACK), адаптации канала связи и отправки полученных результатов в блок сбора статистики [4]. Канальный уровень представлен на рисунке 3.

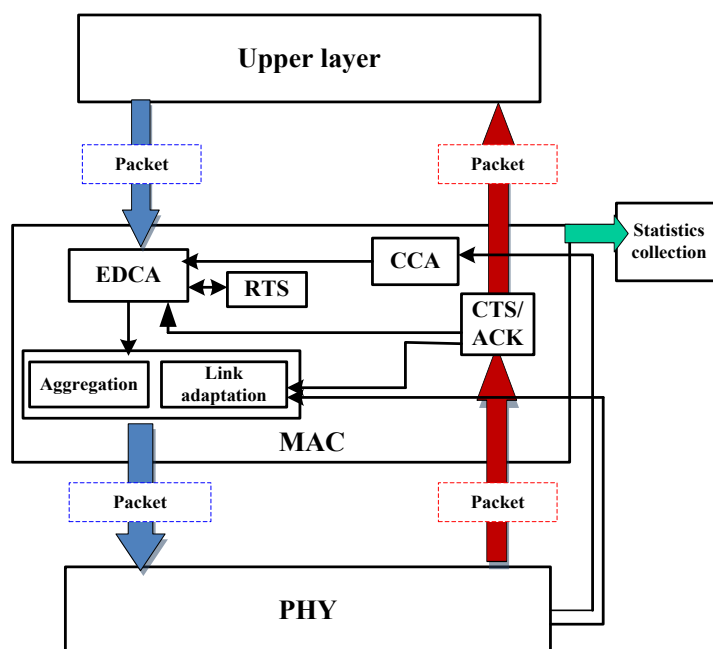


Рис. 3. Канальный уровень модели MATLAB

Представленная модель позволяет конфигурировать различные параметры точки доступа и приемных станций.

Была произведена симуляция реализации сценария Wi-Fi 6. Для этого задавались параметры точек доступа и приемных станций. Длительность симуляции – 1 с. Задание параметров осуществлялось с помощью объекта `wlanDeviceConfig`.

Основные параметры передающих станций (AP):

- модуляционно-кодирующая схема – 4;
- мощность передачи – 15 дБм;
- формат передачи данных: HE-MU-OFDMA;
- используемая частота – 5180 МГц.

На рисунке 4 представлены результаты симуляции представленной модели с указанными параметрами для точки доступа. В результате получаются следующие параметры производительности – Throughput (пропускная способность), Packet Loss Ratio (потеря пакетов) и Latency (задержка). Средняя задержка пакетов показывает среднюю задержку, которую испытывает каждая приемная станция STA при приеме нисходящего трафика от точки доступа AP.

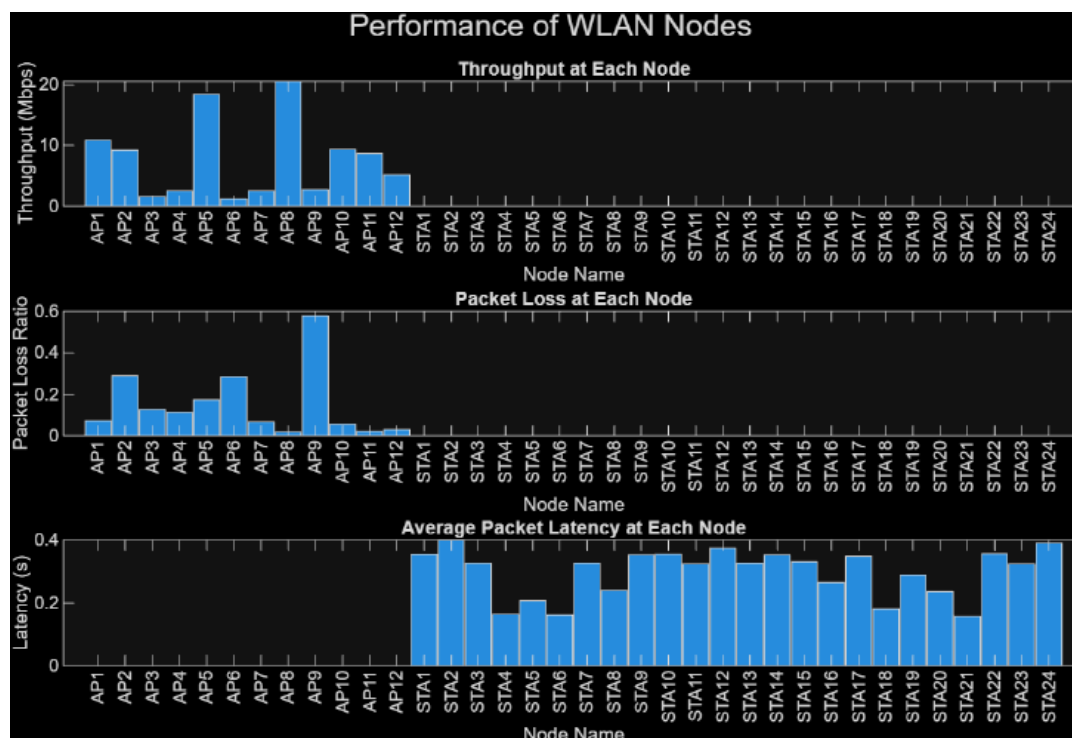


Рис. 4. Результаты симуляции – пропускная способность, потеря пакетов и задержка в передаче данных

В результате можно сказать, что данная модель является инструментом, который для заданного канала и состояния сети определяет один из основных параметров производительности Wi-Fi – задержку.

Модель учитывает влияние мешающих факторов – в данном случае это соседние точки доступа и приемные станции, а также учитывает затухание из-за стен и расстояния между элементами.

Модель решает задачу определения задержек и того, что на задержку влияет, позволяет выявить комбинации параметров, дающие определенные значения задержек.

Представленная модель позволяет оценить, способен ли Wi-Fi 6 обеспечить задержки, удовлетворяющие требованиям сценария IMT-2030. Также данная модель позволяет определить, что именно влияет на форми-

рование задержек Wi-Fi 6 и дает возможность не просто констатировать этот факт, а количественно управлять задержкой через обоснованный выбор сигнально-кодовых конструкций и настроек OFDM-нумерологии.

Список используемых источников

1. Series I. Mobile, radiodetermination, amateur and related satellite services // Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2030 and beyond, Recommendation ITU. 2023. С. 19.
2. Хоров Евгений Михайлович. Разработка и исследование методов множественного доступа сетей Wi-Fi в сценариях IMT-2020: диссертация доктора технических наук: 05.12.13 / Хоров Евгений Михайлович; [Место защиты: ФГАОУ ВО «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)»]. Москва, 2022. 374 с.
3. 802.11ax Multinode System-Level Simulation of Residential Scenario Using MATLAB // mathworks.com, URL: <https://www.mathworks.com/help/wlan/ug/802-11ax-multinode-system-level-simulation-of-residential-scenario-using-matlab.html> (дата обращения: 20.05.2026).
4. Porat R. et al. 11ax Evaluation Methodology // IEEE P802.11 Wireless LANs, Document IEEE 802.11-14/0571r12, 2016. URL: <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/14/11-14-0571-02-00ax-evaluation-methodology.docx> (дата обращения: 15.04.2026).

LATENCY MANAGEMENT IN WI-FI 6

Tikhomirov A., Korotin V.

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

Latency management in Wi-Fi 6 networks is investigated. An existing model for predicting data packet transmission is presented. This data packet transmission prediction model takes into account the physical and data link layer parameters of the open systems interconnection model: the choice of orthogonal frequency-division multiplexing numerology, modulation-coding schemes, and medium access parameters. The model enables real-time latency determination.

Key words: wireless local area networks, Wi-Fi 6, latency, IMT-2030, MATLAB

УДК 654.164

ГРНТИ 49.33.29

АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ ПЛАНИРОВАНИЯ РЕСУРСОВ В СЕТЯХ МНОЖЕСТВЕННОГО ДОСТУПА

В. Е. Коротин, В. Б. Фам

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В последние годы стремительный рост приложений реального времени, таких как виртуальная реальность (VR), беспилотные автомобили и передача видео сверхвысокой четкости, предъявляет строгие требования к качеству обслуживания (QoS) в беспроводных сетях. Появление стандарта IEEE 802.11be (Wi-Fi 7) знаменует собой важную веху, направленную на достижение сверхвысокой пропускной способности (EHT) и сверхнизкой задержки (URLLC). Для реализации этих целей ключевую роль играют передовые методы планирования ресурсов, обеспечивающие эффективное управление сложными радиоресурсами.

планирования ресурсов, малая задержка, сети множественного доступа

Эволюция алгоритмов планирования ресурсов в сетях с множественным доступом

На протяжении десятилетий сети Wi-Fi функционировали на основе принципа «прослушивания канала перед передачей» (Listen Before Talk) посредством механизма CSMA/CA. Однако в условиях резкого роста плотности устройств и появления требований к сверхнизким задержкам (например, в стандартах IEEE 802.11p/bd для беспроводных систем V2X), традиционный механизм состязательного доступа продемонстрировал значительные ограничения производительности. Таким образом, в настоящее время необходимо уделить внимание следующим исследовательским задачам: эффективному распределению ресурсов и оптимальным методам планирования.

Появление Wi-Fi 6 (802.11ax) ознаменовало значительный прогресс в методах планирования: от «прослушивания канала перед передачей» к разделению каналов передачи на более мелкие поднесущие (20 МГц, 40 МГц, 80 МГц или 160 МГц), называемые ресурсными единицами (RU). В этой архитектуре точка доступа (Access Point – AP) выступает в роли «координатора», который определяет, какому устройству, в течение какого

времени и на каких ресурсных единицах (Resource Unit – RU) разрешена передача данных.

Как известно, алгоритмы планирования можно разделить на две основные группы: независимые от канала и зависимые от канала. Независимое от канала планирование распределяет ресурсы равномерно между устройствами независимо от условий передачи или типа трафика данных. Наиболее известные алгоритмы – это Round Robin и Airtime Fairness. Напротив, зависящее от канала (динамическое) планирование распределяет ресурсы на основе информации о состоянии канала и требованиях QoS. В этом случае устройства обычно передают отчеты о качестве канала, уровне заполнения очереди и приоритетах сервиса. Планировщик использует эту информацию для вычисления приоритетной метрики и выбора наиболее подходящего устройства для каждого Resource Unit.

Алгоритм циклического обслуживания (Round Robin – RR)

Принцип работы: устройства, подключенные к Wi-Fi, выстраиваются в очередь (Queue). Точка доступа (AP) разрешает передачу данных первому устройству, затем второму, третьему и так далее до последнего, после чего цикл возвращается к первому устройству [1]. Каждому устройству выделяется равный промежуток времени (называемый квантом или тайм-слотом) для передачи данных. Если устройство заканчивает передачу до истечения времени, оно уступает очередь. Если передача не завершена, она прерывается, и устройство должно ждать своего следующего череда в новом цикле.

Преимущества: гарантирует доступ к сети всем устройствам, исключая «голодание» ресурсов (starvation). Алгоритм прост в реализации и имеет низкую вычислительную сложность. Подходит для сред, где устройства имеют примерно одинаковые потребности в пропускной способности.

Недостатки: не учитывается качество сигнала устройства. Удаленное устройство (со слабым сигналом) может занимать канал дольше, что снижает общую скорость всей сети. Нет разделения пакетов по важности (например, видеозвонки требуют более высокого приоритета, чем загрузка файлов).

Максимальная пропускная способность (Max Throughput – MT)

Принцип работы: алгоритм MT оценивает качество канала связи всех подключенных устройств. Он выбирает пользователя с самой высокой потенциальной скоростью передачи данных для передачи в следующем тайм-слоте. Целью является максимизация общей пропускной способности (сум-

марного объема используемого трафика) всей сети Wi-Fi в конкретный момент времени.

Преимущества: достигается максимальная эффективность использования полосы пропускания, так как передача данных происходит только при наилучших условиях канала. Алгоритм очень эффективен в условиях, когда пользователи неподвижны или параметры канала связи практически не меняются.

Недостатки: пользователи, находящиеся далеко от точки доступа (AP) или за препятствиями (со слабым сигналом), обслуживаются редко, что приводит к ситуации «ресурсного голодания» (starvation). Алгоритм не приоритизирует приложения, требующие низкой задержки, так как сфокусирован исключительно на емкости сети.

Справедливое распределение эфирного времени (Airtime Fairness – ATF)

Этот алгоритм работает по принципу «справедливости на основе времени» (Airtime Fairness), а не «справедливости на основе пакетов». Точка доступа (Access Point) выделяет определенный промежуток времени (например, 10 мс) каждому клиенту, независимо от того, какой объем данных он успеет передать за это время. Если у клиента низкая скорость (например, 1 Мбит/с), то за 10 мс он передаст лишь малую часть данных. Точка доступа прервет его и переключится на другого клиента, не дожидаясь завершения передачи всего пакета. В результате быстрые устройства передают больше данных за те же 10 мс, а медленные – меньше. Все получают равное количество времени.

Преимущества: оптимизация пропускной способности: Повышение общей пропускной способности (throughput) сети. Устранение «узкого места»: Предотвращение ситуации, когда старое или медленное устройство замедляет всю систему. Улучшение пользовательского опыта: Современные и мощные устройства работают быстрее, не ограничиваясь скоростью медленных соседей.

Недостатки: устройства на периферии сети по-прежнему получают очень малый объем фактических данных.

Пропорционально-справедливое планирование (Proportional Fair PF)

В отличие от алгоритмов, ориентированных только на пользователей с наилучшим сигналом (Max C/I) или на простое циклическое разделение времени (Round Robin), алгоритм PF (Proportional Fair) балансирует между

двумя факторами: мгновенной скоростью передачи данных ($R_i(t)$) – качеством сигнала пользователя i в данный момент времени, и средней пропускной способностью ($T_i(t)$) – объемом данных, который пользователь i получил в прошлом. Алгоритм PF выбирает для передачи данных пользователя с самым высоким показателем отношения $\frac{R_i(t)}{T_i(t)}$.

Преимущества: когда устройство находится далеко или имеет слабый сигнал, его средняя скорость ($T_i(t)$) падает, что приводит к росту отношения $\frac{R_i(t)}{T_i(t)}$. Это повышает приоритет устройства, позволяя ему получить доступ к передаче после некоторого периода ожидания. Ни одно устройство не остается без связи слишком долго, в отличие от алгоритмов, нацеленных исключительно на максимизацию общей емкости сети. Алгоритм по-прежнему отдает приоритет пользователям с лучшими условиями канала, чтобы эффективно использовать полосу пропускания.

Недостатки: PF может не обеспечивать соблюдение строгих требований к задержкам (delay) или потере пакетов (packet loss) для сервисов реального времени, таких как видеосвязь или VoIP.

Алгоритм Earliest Deadline First (EDF)

Алгоритм EDF в сетях Wi-Fi представляет собой метод динамического планирования пакетов, который приоритизирует передачу данных с ближайшим сроком завершения (deadline). В контексте сетей Wi-Fi (особенно 802.11e/n/ac/ax) EDF используется для оптимизации качества обслуживания (QoS), обеспечивая низкую задержку для приложений реального времени, таких как VoIP и видеостриминг.

Основные принципы работы EDF: приоритет пакета не является фиксированным, а основан на абсолютном времени, к которому должна быть завершена его передача. Пакет с ближайшим дедлайном (наименьшим оставшимся временем) планируется к отправке первым. Если прибывает новый пакет с более ранним дедлайном, чем у текущего, выполнение текущей задачи может быть приостановлено, чтобы передать право владения каналом новому пакету.

Преимущества: оптимизация использования ресурсов (Возможно достижение 100 % загрузки канала, если общая нагрузка не слишком высока). Соблюдение сроков: гарантирует доставку пакетов реального времени в срок эффективнее, чем другие методы планирования.

Недостатки: при чрезмерно высокой нагрузке на сеть пакеты могут начать отбрасываться массово.: если у пакета истекает дедлайн, но условия канала плохие, EDF все равно отдаст ему приоритет, что может привести к напрасной трате ресурсов. Пакеты, не имеющие строгих ограничений по времени, могут откладываться на неопределенный срок.

Алгоритм LOMAS (Latency-driven OFDMA Scheduling)

LOMAS – это передовой алгоритм планирования ресурсов, разработанный для сетей Wi-Fi 6 и последующих поколений (Wi-Fi 7). Он ориентирован на оптимизацию задержек (latency) для приложений реального времени при сохранении высокой пропускной способности (throughput) и обеспечении справедливости между устройствами.[2]

Принципы работы LOMAS: планирование на основе задержек (Latency-driven) – алгоритм рассчитывает текущую задержку пакетов в очередях. Пакеты, задержка которых приближается к предельно допустимой (deadline), получают приоритет и первыми распределяются в ресурсные единицы (RU). Динамическое распределение RU- LOMAS не использует фиксированное распределение. Он оценивает состояние канала и уровень задержки, чтобы определить подходящий размер RU (26, 52, 106, 242, 484, 996 поднесущих) для каждого кадра передачи. Интеграция с UORA (Uplink OFDMA-based Random Access) – в сценариях восходящего канала (uplink) LOMAS может сочетаться с механизмом UORA для эффективного обнаружения и планирования станций (STA), которым требуется немедленная передача данных, даже если они еще не были опрошены (polling). Баланс между низкой задержкой (LL) и пропускной способностью – LOMAS активно выбирает момент для использования OFDMA (несколько пользователей, малые пакеты) или режима Single-User (SU – один пользователь, большие пакеты) для достижения максимальной эффективности без ущерба для общей полосы пропускания.

Основные преимущества LOMAS: значительное снижение задержек – позволяет гораздо эффективнее удовлетворять строгие требования к задержкам по сравнению с обычными алгоритмами. Повышение эффективности сети – существенно увеличивает количество пакетов, доставленных вовремя. Минимальные потери пропускной способности – лишь незначительное снижение throughput в обмен на колоссальное улучшение показателей задержки. Сравнение алгоритмов показана в таблице 1.

ТАБЛИЦА 1. Сравнение алгоритмов

Алгоритм	Преимущества	Недостатки	Применение
Round Robin (RR)	Простота реализации, отсутствие «голодания»	Не учитывает качество канала; медленные устройства тормозят сеть	Сети с однотипными устройствами и трафиком
Max Throughput (MT)	Скорость всего сети оптимизирована	Удаленных устройств не получают ресурсы	Статичные условия, где важна только пиковая скорость
Airtime Fairness (ATF)	Быстрые устройства не ждут медленных	Устройства на периферии получают очень мало данных	Смешанные сети (старые + новые устройства)
Proportional Fair (PF)	Компромисс между эффективностью и справедливостью; нет «голодания»	Сложность алгоритма; не гарантирует сверхнизкие задержки для VoIP	Стандартные Wi-Fi сети
Earliest Deadline First (EDF)	Лучшая поддержка QoS и приложений реального времени	Массовый сброс пакетов при перегрузке	Мультимедийные сервисы с жесткими требованиями к задержке
LOMAS (Wi-Fi 6/7)	Сверхнизкая задержка (URLLC)	Высокая вычислительная сложность алгоритма	Сети высокой плотности

Выводы и перспективы

Алгоритмы планирования ресурсов в сетях Wi-Fi эволюционировали от простых к сложным, чтобы соответствовать требованиям современной жизни. С появлением стандартов Wi-Fi 6/7 были разработаны такие алгоритмы планирования, как Airtime Fairness, планирование OFDMA, а также более совершенные алгоритмы, например LOMAS, которые сделали возможной реализацию перспективных приложений, таких как беспилотные автомобили. Однако для достижения сверхнадежной связи с низкой задержкой (URLLC) необходимо снижать задержку не только на одном уровне, а одновременно на физическом уровне (PHY) и уровне управления доступом к среде (MAC).

Список использованных источников

1. Rongping Lin, Jinpeng Zhang, Shan Luo, Jing Fu, Xiong Wang, Hui Li, Moshe Zukerman. Real-Time Priority Queue Scheduling for Bursty Traffic // IEEE Internet of Things Journal. 2025.V.12, N 24, C.55883-55892.
2. Tai Y. -A., Liu Y. -W., Kao P. -K., Lee T. -Y., Hu C. -I. and Li C. -Y. LOMAS: Latency-driven OFDMA Scheduling Design in Wi-Fi 6 Networks // 2025 IEEE 33rd International Conference on Network Protocols (ICNP). Seoul, Korea, Republic of, 2025, C. 1-11. DOI: 10.1109/ICNP65844.2025.11192340.

**ANALYSIS OF RESOURCE SCHEDULING ALGORITHMS
IN MULTIPLE-ACCESS NETWORKS**

Korotin V., Pham V.

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

In recent years, the rapid growth of real-time applications-such as virtual reality (VR), autonomous vehicles, and ultra-high-definition video streaming-has imposed stringent quality of service (QoS) requirements on wireless networks. The emergence of the IEEE 802.11be (Wi-Fi 7) standard marks a major milestone, aimed at achieving Extremely High Throughput (EHT) and Ultra-Reliable Low-Latency Communication (URLLC). To realize these goals, advanced resource scheduling methods play a pivotal role, ensuring efficient management of complex radio resources.

Key words: resource scheduling, low latency, multiple-access networks

УДК 621.391.63
ГРНТИ 494629

БЕСПРОВОДНЫЙ ДОСТУП ВНУТРИ ПОМЕЩЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОПТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ

В. Е. Коротин, В. Б. Фам

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Рассмотрены решения по формированию беспроводных сетей внутри помещений и на участке доступа магистральных линий к внутридомовым сетям с помощью технологии LiFi. Проанализирована проблематика принятия решения о хэндовере в гибридной LiFi/Wi-Fi сети и предложены средства, повышающие эффективность рассмотренного метода многокритериального поиска решения.

LiFi, Wi-Fi, HWLNet, хэндовер

Важным аспектом успешной реализации задач по созданию надежного и производительного беспроводного доступа, обеспечивающего связность Интернета вещей в условиях высокой плотности данных (бит/с на единицу площади или объема), является внедрение гетерогенных структур доступа с использованием традиционных радио решений (3GPP и IEEE стандартов) и оптических аттосот сетей LiFi [1]. Кроме того, как известно, решения IMT-2030 не предполагают обеспечения доступа в подводной среде, где технология LiFi могла бы тоже успешно конкурировать с традиционными патентованными решениями электроакустики [2, 3], делая таким образом оптические беспроводные коммуникации (OWC) полезным компонентом технологий при переходе к 6G и далее.

Развитие и совершенствование PHY слоя LiFi (стандарт IEEE 802.11bb) на базе единой с Wi-Fi технологии OFDM создает условия для формирования бесшовной на физическом уровне гетерогенной сети беспроводной доступа. При этом концептуально существуют две возможности взаимодействия сегментов Wi-Fi и LiFi в такой сети: в случае несимметричного трафика реализация UL посредством Wi-Fi, а DL – LiFi, либо всеобъемлющее замещение Wi-Fi соединений в периоды повышенной нагрузки. Причем второй вариант взаимодействия может оказаться более перспективным в связи с тем, что это создает благоприятные условия для повышения про-

изводительности и тех сегментов Wi-Fi, которые не используют разгрузку через аттосоты LiFi. Основными факторами, определяющими потребность в HWLNet (Hybrid WiFi and LiFi Network – гибридных радио-оптических сетях), являются ограниченность площади засветки, приводящая к частой процедуре эстафетной передачи при быстром перемещении пользователя и высокая вероятность блокировки связи из-за возникающего эффекта затенения пользовательской станции в сетях LiFi, а также ограниченность радио ресурса сетей Wi-Fi.

Существующий на сегодняшний день успешный опыт реализации таких гибридных LiFi/Wi-Fi сетей, позволяет надеяться на их широкое внедрение, опирающееся на адекватную оценку применимости в определенных условиях – сценариев использования. Один из сценариев представлен в эксперименте [4] – управление эстафетной передачей обслуживания (НО – handover) в гибридной сети при медленном перемещении мобильного устройства с запущенным видео сервисом высокой четкости (рис. 1) из центра одной аттосоты LiFi в другую (горизонтальный НО) и при блокировке канала LiFi – подключение к точке доступа Wi-Fi (вертикальный НО).

Отработанный механизм управления передачей обслуживания в предыдущем эксперименте позволил в опытной зоне, состоящей из 8 аттосот LiFi на стандартных светодиодных светильниках в учебном классе и точек доступа Wi-Fi стандарта IEEE 802.11ac, провести измерения при балансировке нагрузки между Wi-Fi и LiFi сегментами гибридной сети, представленные на рис. 2 и 3.

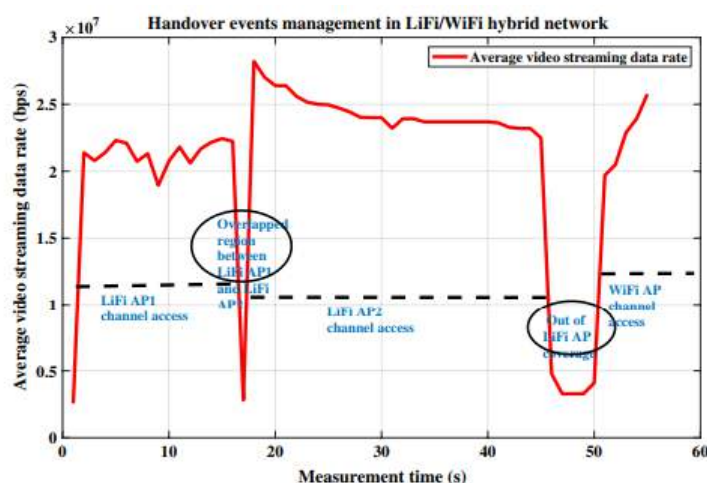


Рис. 1. Средняя скорость потокового видео при передаче обслуживания LiFi на LiFi и с LiFi на Wi-Fi

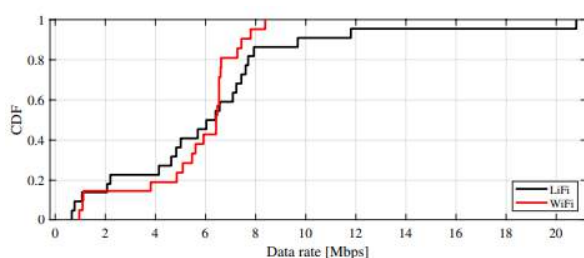


Рис. 2. Кумулятивная функция распределения пиковой скорости доступа в гибридной сети LiFi/Wi-Fi

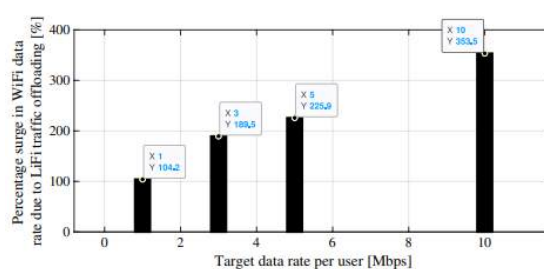


Рис. 3. Рост скорости Wi-Fi доступа для разных целевых показателей

Кумулятивная функция распределения (CDF) на рис. 2 свидетельствует, что пиковая скорость передачи данных пользователя в сети LiFi выше, несмотря на то что максимальная скорость данных LiFi примерно в 10 раз ниже Wi-Fi. Объяснить это можно следующим:

- использование стандартных светодиодных светильников с пропускной способностью до 43 Мбит/с;
- точки доступа LiFi совмещены с инфраструктурой освещения (8 светильников на класс с пятнами засветки от 2,8 до 3,5 м в диаметре, а отношение с/ш снижается на 15 дБ при удалении от центра аттосоты на 1 метр [5]);
- сравнительно низкая эффективность MAC протокола Wi-Fi;
- точка доступа Wi-Fi обслуживала еще и другие классы.

Последнее обстоятельство позволило установить, что в соседних классах, где обеспечен только Wi-Fi доступ, скорость передачи данных резко возросла для разных целевых показателей (рис. 3), и это свидетельствует о способности сети LiFi к разгрузке трафика сети Wi-Fi.

В общем случае выполнение процедуры выбора точки доступа (APA – access point assignment) в гибридной сети LiFi/Wi-Fi определяется двумя факторами: необходимостью балансировки нагрузки (LB – load balancing) и/или устранения затенения светового потока вследствие мобильности пользователя, что приводит в обоих случаях к выполнению процедуры хэндовера. LB, APA и HO имеют причинно-следственные связи [6], прямые – Dir и косвенные – InDir (рис. 4). Так, при выполнении HO возникает прямая необходимость в процедурах APA и LB.

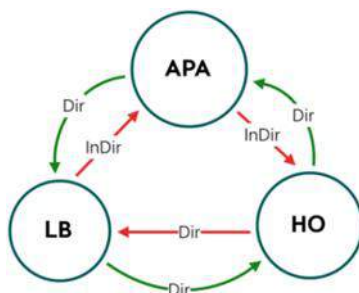


Рис. 4. Причинно-следственные связи процедур гибридной сети

А при использовании одного из методов ЛВ может иметь место косвенный запрос АРА в зависимости от конфигурации системы. Поэтому важно иметь определенную методологию АРА, которая опиралась бы на набор критериев, связанных с характеристиками LiFi/Wi-Fi сети, определение степени их влияния и взаимозависимости. Решение такой многокритериальной задачи применительно к сети из нескольких аттосот LiFi и покрывающую их общую зону обслуживания одной Wi-Fi точки доступа приведено в [6] и опирается на следующую систему критериев:

- WiFi capacity – пропускная способность точки доступа Wi-Fi,
- LiFi capacity – пропускная способность аттосоты LiFi,
- LiFi CDT – (cell dwell time) время между ННО (временной интервал между переходом обслуживания от одной аттосоты LiFi к другой),
- Occurrence rate – число блокировок оптического канала в единицу времени,
- Occupation rate – процент времени блокировки канала оптической связи.

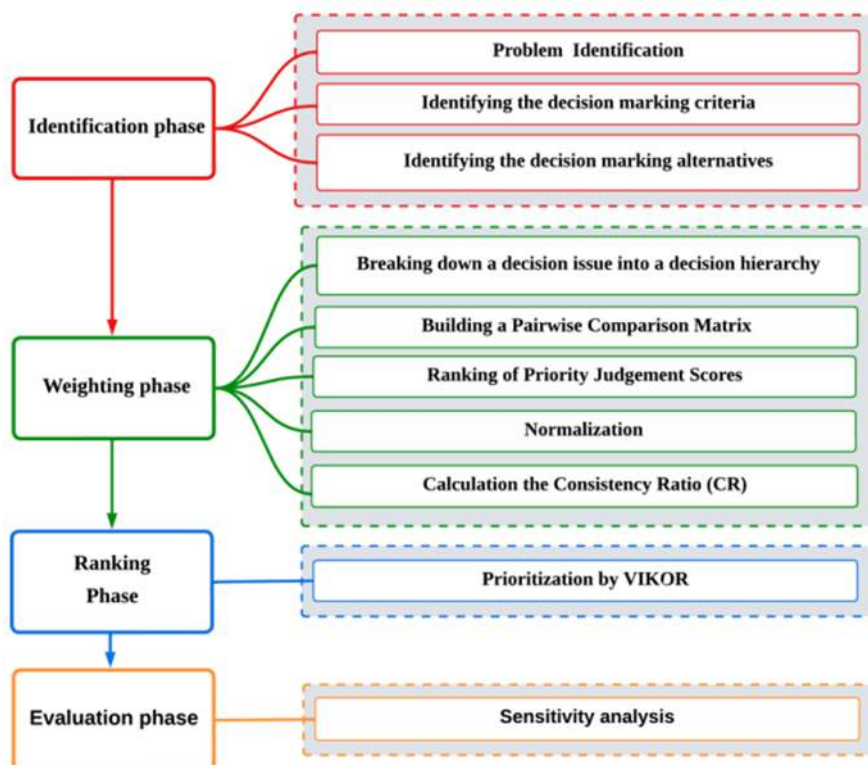


Рис. 5. Фазы процесса АРА с подразделением на этапы

Ряд этапов многокритериального выбора (рис. 5) надлежащей точки доступа может быть сделан более эффективным, если усилить их логику привязкой к условиям практической реализации. Предлагается на этапах ФАЗЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ учитывать характеристики используемого Wi-Fi обо-

рудования при выборе альтернатив пропускной способности, а при определении характеристик LiFi (CDT, Occurrence rate, Occupation rate) учитывать плотность размещения светильников и предел скорости мобильных объектов. Но главное, что придает анализу более практико-ориентированный и менее умозрительный характер – при попарной сравнительной оценке значимости (веса) критериев вместо мнения экспертов опираться на знание особенностей и конкретных условий функционирования анализируемой сети. Анализ, проведенный с учетом таких доработок методики применительно к описанной выше опытной зоне в классах, позволил определить точку доступа Wi-Fi как наилучшую для выполнения АРА.

Средства LiFi также могут быть полезны при реализации транзитных соединениях между сетями доступа внутри помещений и сетевым шлюзом, обеспечивая в некоторых сценариях единственное практически значимое решение. Речь о промышленно выпускаемых мостах [7], предназначенных для прокладки магистрали внутрь помещения через остекление (рис. 6). Существуют примеры в отечественной практике использования данного решения при обеспечении покрытия 5G в зданиях.

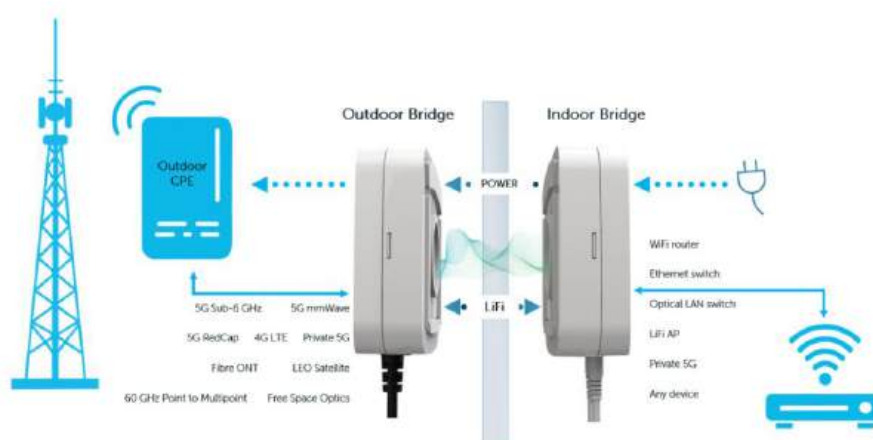


Рис. 6. Гибридная архитектура доступа

Рассмотренные подходы к использованию LiFi позволяют сделать вывод о том, что на сегодняшний день эта технология уже в состоянии обеспечить расширение зон покрытия 5G на внутри домовые пространства, а также выступать в роли средства разгрузки сетей Wi-Fi причем для этой функциональности существуют научно обоснованные подходы к выбору обслуживающей точки доступа HWLNet при выполнении как горизонтального, так и вертикального хэндовера.

Список используемых источников

1. Basnayaka D. A., Haas H. Hybrid RF and VLC Systems: Improving User Data Rate Performance of VLC Systems // 2015 IEEE 81st Vehicular Technology Conference (VTC Spring), Glasgow, UK. 2015. PP. 1-5. DOI: 10.1109/VTCSpring.2015.7145863.
2. Zedini E., Oubei H. M., Kammoun A., Hamdi M., Ooi B. S., Alouini M.-S. Unified Statistical Channel Model for Turbulence-Induced Fading in Underwater Wireless Optical Communication Systems // IEEE Transactions on Communications. 2019. Vol. 67. N 4. PP. 2893-2907. DOI: 10.1109/TCOMM.2019.2891542.
3. Zedini E., Ata Y., Mahdi Al-Sallami F., Rajbhandari S. Evaluation of Underwater Optical Wireless Channels Over F Turbulence for Different Detection Types // IEEE Transactions on Communications. 2025. Vol. 73. N 3. PP. 1925-1937. DOI: 10.1109/TCOMM.2024.3454696.
4. Harald Haas et al. Introduction to indoor networking concepts and challenges in LiFi // Journal of Optical Communications and Networking. February 2020. Vol. 12. N 2.
5. Besjedica T., Fertalj K., Lipovac V., Zakarija I. Evolution of Hybrid LiFi–WiFi Networks: A Survey. Sensors 2023, 23, 4252. URL: <https://doi.org/10.3390/s23094252> (дата обращения: 10.05.2026).
6. Badeel R., Subramaniam S. K., Muhammed A., Hanapi Z. M. A Multicriteria Decision-Making Framework for Access Point Selection in Hybrid LiFi/WiFi Networks Using Integrated AHP–VIKOR Technique. Sensors 2023. 23, 1312. URL: <https://doi.org/10.3390/s23031312> (дата обращения: 10.05.2026).
7. Компания pureLiFi. URL: <https://www.purelifi.com/products/bridge-xc/> (дата обращения: 01.04.2026).

WIRELESS INDOOR ACCESS USING OPTICAL COMMUNICATIONS**Korotin V., Pham V.**

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

LiFi solutions on indoor wireless networks deployment and for backhaul inlet to indoor network infrastructure are considered. The issues concerning decision making on access point handover in hybrid LiFi/Wi-Fi network are analysed and the means are proposed to improve efficiency of debated methodology for access point selection.

Key words: *LiFi, Wi-Fi, HWLNet, handover*

УДК 621.391
ГРНТИ 49.03.05

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕДАЧИ ВИДЕОФАЙЛА В УЗКОПОЛОСНОМ КАНАЛЕ ТОНАЛЬНОЙ ЧАСТОТЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОРТОГОНАЛЬНОГО БАЗИСА ФИНИТНЫХ ФУНКЦИЙ

В. Д. Коротченко

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I

Представлены результаты практического эксперимента передачи цифрового видеофайла формата MP4 через узкополосный канал тональной частоты с полосой 300–3400 Гц с использованием ранее синтезированного ортогонального базиса финитных функций. Результаты подтверждают работоспособность разработанного базиса к каналу тональной частоты, аналоговым сетям поездной радиосвязи (2,13 МГц), УКВ-радиостанциям (160 МГц).

ортогональный базис, финитные функции, узкополосный канал связи, канал тональной частоты, BPSK, цифровая обработка сигналов

Узкополосные каналы связи остаются одним из основных классов трактов передачи данных в задачах ведомственной и специальной связи: канал тональной частоты (300–3400 Гц), аналоговые сети поездной радиосвязи на частоте 2,13 МГц, УКВ-радиостанции диапазона 160 МГц. Общим свойством указанных трактов является крайне ограниченный частотный ресурс при необходимости передачи сложных видов трафика – от телеметрических сообщений до мультимедийных потоков.

Опубликованные результаты [1–3] получены преимущественно на синтетических потоках случайных бит и подтверждают теоретическую корректность построения базиса и оценок BER. Для перехода от теоретической модели к практическим приложениям требуется экспериментальная проверка работоспособности предложенного базиса при передаче реальной полезной нагрузки произвольного двоичного формата с контролем целостности на уровне всего сообщения, а не только на уровне отдельных бит.

В работе [4] В. А. Вершининым рассмотрена передача двоичных сообщений ортогонализированными сигналами на основе матрицы Адамара при импульсной помехе. Вейвлетные подходы к построению сигнальных базисов с хорошей частотно-временной локализацией развиваются в работах В. П. Волчкова [5].

Цель работы: экспериментально подтвердить применимость ортогонального базиса финитных функций, передачи двоичного файла произвольного формата (на примере видеофайла MP4) через узкополосный канал тональной частоты в условиях аддитивного белого гауссовского шума. Для достижения сформулированной цели разработан программный стенд на языке MATLAB, реализующий полный тракт передачи: формирование передаваемого пакета, модуляция на основе ортогонального базиса, добавление аддитивного белого гауссовского шума с заданным отношением E_b/N_0 , и обратное декодирование с контролем целостности.

В рамках эксперимента решаются следующие частные задачи:

- разработка структуры пакета, обеспечивающей корреляционную синхронизацию приемника и контроль целостности полезной нагрузки;
- выбор и подготовка тестового видеофайла как представителя реальной полезной нагрузки сложного формата;
- проведение серии замеров вероятности битовой ошибки при различных значениях E_b/N_0 и сопоставление полученных значений с теоретической кривой BPSK;
- верификация целостности восстановленного видеофайла побайтным сравнением, контролем хеш-функции MD5 и подтверждением корректного декодирования восстановленного контейнера.

Параметры канала связи: полоса частот 300-3400 Гц, длительность кадра 10 мс, частота дискретизации 48 кГц.

Передаваемая последовательность байт упаковывается в пакет, состоящий из четырех логических блоков: преамбулы для синхронизации приемника, заголовка с метаданными и контрольной суммой, полезной нагрузки и трейлера с контрольной суммой полезной нагрузки.

Преамбула формируется как последовательность из 134 BPSK-символов на основе m -последовательности, генерируемой регистром сдвига с обратной связью по полиному $x^7 + x^6 + 1$ длиной 127 (с повторением до требуемой длины). Длина преамбулы выбрана из расчета двух кадров по 67 информационных символов каждый, что обеспечивает устойчивый корреляционный пик при низких отношениях сигнал/шум.

Заголовок длиной 8 байт содержит маркер для идентификации формата файла 0xA55A (2 байта), длину полезной нагрузки в байтах (4 байта) и контрольную сумму CRC-16 (2 байта) первых 6 байт заголовка. CRC-16 использован для раннего обнаружения сбоя при синхронизации, до начала декодирования основного тела пакета. Трейлер длиной 4 байта содержит контроль-

ную сумму CRC-32 от тела полезной нагрузки и обеспечивает контроль целостности всего сообщения. На приемной стороне выполняется поиск преамбулы методом скользящей корреляции с эталонным образцом, по знаку максимума корреляции определяется фазовая неоднозначность BPSK. Демодуляция кадров выполняется проекцией принятого сигнала на ортонормированный базис с последующим жестким решением по знаку проекции. Целостность контролируется на двух уровнях – заголовка (CRC-16) и полезной нагрузки (CRC-32). Для эксперимента подготовлен тестовый видеофайл формата MP4 длительностью 2 секунды, содержащий видеопоток (кодек H.264, разрешение 160×120 пикселей, частота кадров 10 кадров/с) и аудиопоток (кодек AAC, частота дискретизации 44,1 кГц, битрейт 32 кбит/с). Размер файла составил 23 349 байт (186 792 бит полезной нагрузки).

При передаче 23 349 байт полезной нагрузки общий объем пакета составил 2 792 кадра по 67 информационных символов (включая 2 кадра преамбулы, 1 кадр заголовка и 2 789 кадров полезной нагрузки с CRC-32). Длительность сформированного WAV-сигнала – 27,92 с при частоте дискретизации 48 кГц.

На рис. 1 приведен фрагмент модулированного сигнала, записанного в WAV-файл, и его спектральная плотность мощности. Энергия сигнала строго локализована в полосе канала тональной частоты 300–3400 Гц: спад вне полосы превышает 4 порядка, что подтверждает корректность синтеза базиса по импульсной характеристике идеального полосового фильтра.

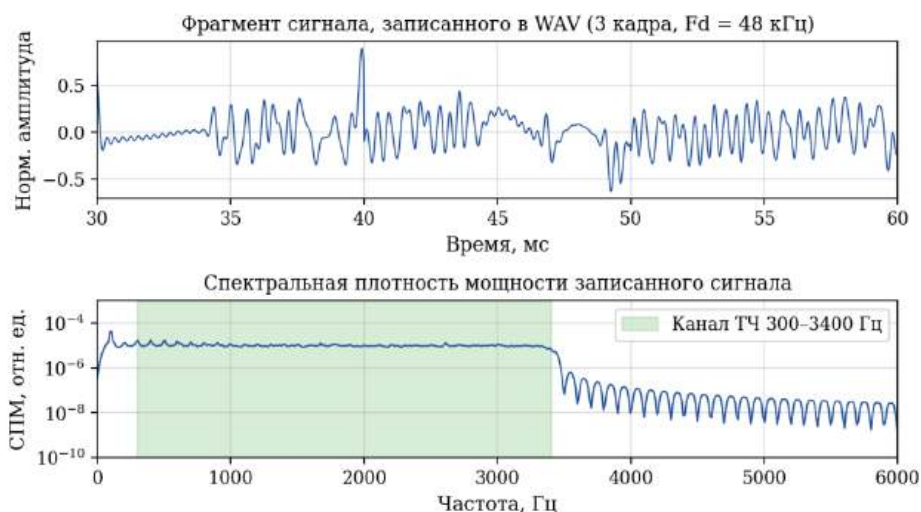


Рис. 1. Временная и частотная характеристика модулированного сигнала: верхний график – фрагмент длительностью 30 мс (3 кадра); нижний график – спектральная плотность мощности на всем интервале

Из таблицы 1 следует, что при $E_b/N_0 \geq 12$ дБ обеспечивается побитно корректная передача всего видеофайла: контрольная сумма CRC-32 полезной нагрузки совпадает, контрольная сумма MD5 восстановленного файла идентична исходной, восстановленный MP4-контейнер корректно декодируется штатным проигрывателем.

При соотношении сигнал/шум в диапазоне 6–10 дБ синхронизация и контроль заголовка проходят успешно (CRC-16 заголовка не нарушается ни в одном из замеров), однако в теле полезной нагрузки фиксируется небольшое число битовых ошибок (от 446 до 2 шт. на 186 792 бит), не позволяющих восстановить файл побитно.

ТАБЛИЦА 1. Результаты передачи видеофайла MP4 (23 349 байт = 186 792 бит) при различных E_b/N_0

E_b/N_0 , дБ	CRC синхронизации	CRC данные	Бит. ошибок	BER эксп.	MD5
6	+	-	446	$2,39 \cdot 10^{-3}$	нет
7	+	-	136	$7,28 \cdot 10^{-4}$	нет
8	+	-	34	$1,82 \cdot 10^{-4}$	нет
9	+	-	6	$3,21 \cdot 10^{-5}$	нет
10	+	-	2	$1,07 \cdot 10^{-5}$	нет
12	+	+	0	$5,4 \cdot 10^{-6}$	да

Предложенный базис обеспечивает передачу 67 бит за 10 мс, что соответствует канальной скорости 6 700 бит/с в полосе 3 100 Гц, или 2,16 бит/с/Гц по спектральной эффективности – существенно выше показателя 1 бит/с/Гц для классической BPSK при той же полосе и помехоустойчивости.

Результаты эксперимента подтверждают, что разработанный ортогональный базис на основе ортогональных базисных функций обеспечивает передачу полезной нагрузки произвольного двоичного формата без потерь при отношении сигнал/шум, сопоставимом с типовыми требованиями стандартных каналов связи ($E_b/N_0 = 9$ –12 дБ обеспечивают $BER \leq 10^{-5}$, что характерно для большинства голосовых и телеметрических трактов).

Полученные результаты применимы к проектированию модемов узкополосных трактов связи на железнодорожном транспорте поездная радио-

связь 2,13 МГц, УКВ-радиостанций диапазона 160 МГц. Дальнейшие исследования связаны с расширением экспериментальной программы на каналы с замираниями и многолучевым распространением.

Список используемых источников

1. Ходаковский В. А., Коротченко В. Д. Синтез ортогонального базиса на конечном временном интервале для цифровой обработки сигналов с ограниченным спектром // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2025. № 2 (42). С. 71–82
2. Коротченко В. Д., Ходаковский В. А. Увеличение скорости передачи данных в телеметрических системах с электромагнитным каналом связи за счет применения ортогональных базисных функций // Автоматизация и информатизация ТЭК. 2026. № 2 (631). С. 21–26.
3. Коротченко В. Д. Модели синтеза ортогональных базисных функций на основе характеристик идеального полосового фильтра // Век качества. 2026. № 1. С. 249–263.
4. Вершинин В. А. Передача двоичных сообщений ортогонализированными сигналами на основе матрицы Адамара при импульсной помехе // Журнал радиоэлектроники. 2025. № 10. С. 1–10.
5. Гришенцев А. Ю. Метод синтеза алфавитов ортогональных сигнальных широкополосных сообщений / А. Ю. Гришенцев // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. Т. 18. № 6. С. 1074–1083. DOI: 10.17586/2226-1494-2018-18-6-1074-1083.

Статья представлена научным руководителем, профессором кафедры электрической связи ПГУПС, доктором технических наук В. А. Ходаковским.

EXPERIMENTAL STUDY OF VIDEO FILE TRANSMISSION OVER A NARROWBAND VOICE-FREQUENCY CHANNEL USING AN ORTHOGONAL BASIS OF FINITE FUNCTIONS

Korotchenko V.

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University

The results of a practical experiment on transmitting a digital video file in MP4 format over a narrowband voice-frequency channel with a bandwidth of 300–3400 Hz using a previously synthesized orthogonal basis of finite functions are presented. The obtained results confirm the operability of the developed basis in a voice-frequency channel, as well as in analog train radio communication networks (2.13 MHz) and VHF radio stations (160 MHz).

Key words: *orthogonal basis, finite functions, narrowband communication channel, voice-frequency channel, BPSK, digital signal processing*

УДК 654.739

ГРНТИ 49.33.29

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЙРОСЕТЕВОГО ПРЕДЫСКАЗИТЕЛЯ ДЛЯ КОМПЕНСАЦИИ НЕЛИНЕЙНОСТИ УСИЛИТЕЛЕЙ МОЩНОСТИ

Е. В. Кравец, Н. Д. Пигарев

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В работе рассматривается нейросетевой предсказатель усилителя мощности для широкополосных OFDM-сигналов, реализованный в среде MATLAB. Выполнено моделирование и анализ влияния архитектуры сети и глубины памяти на эффективность подавления внеполосных излучений. Показаны ограничения нейросетевого подхода и условия его эффективного применения.

цифровое предсказание, усилитель мощности, нейросетевой DPD, MATLAB, OFDM, ACPR, нелинейные искажения, 5G/6G

Современные системы радиосвязи используют широкополосные сигналы, при передаче которых существенно проявляются нелинейные искажения усилителей мощности. Одним из подходов к их компенсации является цифровое предсказание, однако традиционные модели с фиксированной структурой ограничены в описании сложных нелинейных и динамических эффектов [1].

Нейросетевые методы рассматриваются как универсальный инструмент аппроксимации нелинейных систем, способный учитывать как амплитудные, так и динамические искажения [2]. При этом их эффективность определяется не только самим подходом, но и выбором архитектуры, параметров обучения и глубины памяти, что требует отдельного анализа. Целью работы является исследование нейросетевого предсказателя усилителя мощности и анализ влияния его параметров на эффективность подавления внеполосных излучений.

Модель нейросетевого предсказателя (NN-DPD)

Задача цифрового предсказания рассматривается как аппроксимация обратного оператора усилителя мощности с учетом его нелинейности и эффектов памяти. В нейросетевом подходе эта зависимость формируется в процессе обучения, без предварительного задания структуры модели.

В работе используется многослойный перцептрон, реализующий нелинейное отображение входного вектора, сформированного из действительной и мнимой частей текущего и задержанных отсчетов сигнала. Для глубины памяти $M = 1$ вход имеет вид $[I(n), Q(n), I(n-1), Q(n-1)]$. Архитектура сети включает два скрытых слоя по 32 нейрона и линейный выходной слой. Обучение выполняется в косвенной архитектуре (Indirect Learning Architecture, ILA) по данным «выход–вход» с использованием среднеквадратичной функции потерь. После обучения модель применяется для формирования предсказанного сигнала на входе усилителя мощности.

Методика моделирования

Моделирование передающего тракта выполнено в среде MATLAB с использованием инструментов RF Blockset и 5G Toolbox. Исследуемая система представлена в виде каскадной модели, включающей генерацию сигнала, блок цифрового предсказания и нелинейный усилитель мощности. Структура моделируемого передающего тракта представлена на рисунке 1.

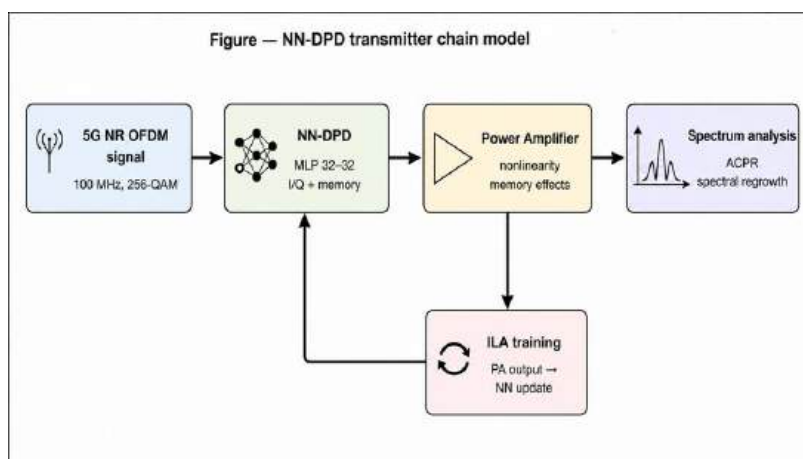


Рис. 1. Структурная схема моделирования передающего тракта с нейросетевым предсказителем (NN-DPD)

Как показано на рисунке, модель включает генератор OFDM-сигнала стандарта 5G NR, нейросетевой предсказатель, поведенческую модель усилителя мощности и блок спектрального анализа [3]. В качестве тестового сигнала используется широкополосный OFDM-сигнал с полосой 100 МГц и модуляцией 256-QAM, представленный в виде комплексной огибающей [4]:

$$x(n) = I(n) + jQ(n)$$

Высокий пик-фактор сигнала (PAPR порядка 8-10 дБ) обуславливает работу усилителя мощности вблизи области насыщения, что приводит к появлению выраженных нелинейных искажений и спектрального расширения.

Нейросетевой предсказатель реализует нелинейное отображение входного вектора с учетом памяти:

$$x_{DPD}(n) = f_{NN}(x(n), x(n-1), \dots, x(n-M))$$

где M – глубина памяти модели. В рассматриваемом случае используется $M = 1$, что соответствует входному вектору.

Обучение нейросетевого предсказателя выполняется по данным выходного сигнала усилителя в рамках косвенной архитектуры, при которой параметры модели определяются из условия минимизации среднеквадратичной ошибки [5]:

$$\mathcal{L} = \mathbb{E}[|x(n) - \hat{x}(n)|^2]$$

где $\hat{x}(n)$ – оценка исходного сигнала, восстановленная по выходу усилителя.

Оценка эффективности предсказателя проводится по уровню внеполосных излучений с использованием метрики ACPR:

$$ACPR = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{adj}}{P_{main}} \right)$$

где P_{main} – мощность в основной полосе сигнала, P_{adj} – мощность в соседней полосе.

Все эксперименты выполняются при фиксированных условиях (идентичный входной сигнал, параметры спектрального анализа и режим работы усилителя, включая входной back-off 8 дБ), что обеспечивает корректность сопоставления результатов.

Результаты моделирования

В отсутствие цифрового предсказания широкий OFDM-сигнал после прохождения нелинейного усилителя мощности демонстрирует выраженную регенерацию спектра, обусловленную интермодуляционными искажениями [6]. Спектр выходного сигнала представлен на рисунке 2. Расчет показал, что уровень внеполосных излучений составляет $ACPR = -11.02$ дБ, что соответствует значительному спектральному расширению.

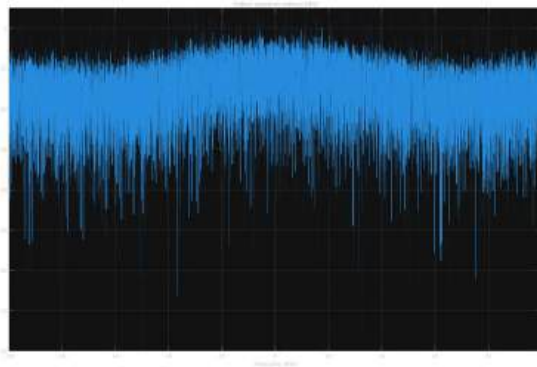


Рис. 2. Спектр выходного сигнала усилителя мощности без цифрового предискажения

Применение нейросетевого предсказателя приводит к частичной компенсации нелинейных искажений усилителя мощности. Соответствующий спектр приведен на рисунке 3. В рассматриваемой конфигурации достигается значение $ACPR = -11.31$ дБ, что указывает на ограниченное улучшение линейности.

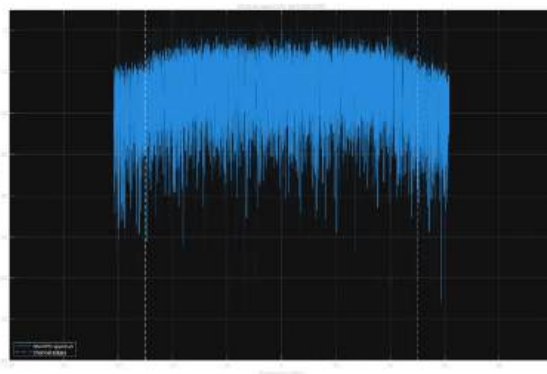


Рис. 3. Спектр выходного сигнала усилителя мощности при использовании нейросетевого предсказателя

Для более детального анализа эффективности нейросетевого подхода рассмотрено влияние архитектуры модели на результат предсказания. В частности, проведено моделирование для различных размеров скрытых слоев нейросети. Полученные значения $ACPR$ приведены в таблице 1.

ТАБЛИЦА 1. Влияние архитектуры NN на $ACPR$

Архитектура NN	$ACPR$, дБ
16-16	-10.9
32-32	-11.31
64-64	-11.85

Как видно из таблицы, увеличение числа параметров нейросети приводит к постепенному улучшению линейности, однако эффект остается ограниченным. Дополнительно исследовано влияние глубины памяти входного вектора. Результаты приведены в таблице 2.

ТАБЛИЦА 2. Влияние глубины памяти

Глубина памяти, М	АСРР, дБ
0	-10,7
1	-11,31
2	-11,6

Полученные результаты показывают, что учет памяти сигнала оказывает заметное влияние на эффективность нейросетевого предсказателя, что связано с динамической природой нелинейных искажений в усилителе мощности.

Результаты моделирования

Полученные результаты показывают, что эффективность NN-DPD определяется архитектурой сети и учетом эффектов памяти. Увеличение числа нейронов улучшает АСРР за счет роста аппроксимационной способности, однако эффект ограничен и сопровождается ростом вычислительной сложности. Существенную роль играет учет памяти: переход от $M = 0$ к $M = 1$ заметно снижает внеполосные излучения, тогда как дальнейшее увеличение глубины памяти дает небольшой выигрыш [7].

Ограниченная эффективность NN-DPD связана с особенностями обучения: нейросеть одновременно определяет структуру и параметры модели, что усложняет задачу аппроксимации. В результате нейросетевой подход, обладая высокой гибкостью, требует тщательной настройки и наиболее эффективен в составе гибридных структур [8, 9].

В работе исследован нейросетевой предсказатель усилителя мощности для широкополосного OFDM-сигнала. Показано, что его эффективность зависит от архитектуры и учета памяти: увеличение параметров улучшает линейность, но не обеспечивает пропорционального выигрыша. Сделан вывод о целесообразности применения NN-DPD в составе гибридных структур.

Список использованных источников

1. 3GPP TS 38.211. NR; Physical channels and modulation. Release 15–17 / 3rd Generation Partnership Project. URL: <https://www.3gpp.org/> (дата обращения: 31.01.2026).
2. Бакулин М. Г., Крейнделин В. Б., Шлома А. М. Применение технологии ММО в современных системах беспроводной связи разных поколений. М.: Горячая линия – Телеком, 2021. 320 с.
3. Гоноровский И. С. Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Радио и связь, 1986. 512 с.
4. Isaksson M., Wisell D., Rönnow D. Comparative analysis of behavioral models for RF power amplifiers // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2006. Vol. 54. No. 1. P. 348–359.
5. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники. М.: Радио и связь, 1989. 656 с.
6. Morgan D. R., Ma Z., Kim J., Zierdt M., Pastalan J. A generalized memory polynomial model for digital predistortion of RF power amplifiers // IEEE Transactions on Signal Processing. 2006. Vol. 54. No. 10. P. 3852–3860.
7. Фокин Г. А., Старилов В. В., Севидов В. В. Radio Coverage Estimation and Ray Tracing with Digital Terrain Models in the MATLAB Environment // 2025 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). 2025. P. 1–6. DOI: 10.1109/WECONF65186.2025.11017262.
8. RF Blockset User’s Guide. Natick, MA: The MathWorks, Inc., 2024. 484 p.
9. 5G Toolbox User’s Guide. Natick, MA: The MathWorks, Inc., 2024. 960 p.

**INVESTIGATION OF NEURAL NETWORK-BASED DIGITAL PREDISTORTION
FOR POWER AMPLIFIER LINEARIZATION****Kravec E., Pigarev N.**

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

This paper investigates a neural network-based digital predistorter (NN-DPD) for power amplifiers operating with wideband OFDM signals. The model is implemented in MATLAB, and the influence of network architecture and memory depth on out-of-band emission suppression is analyzed. The results show that while NN-DPD improves linearity, its performance strongly depends on model configuration and training parameters. The limitations of the neural network approach are identified, and its effective application within hybrid predistortion structures is discussed.

Key words: digital predistortion, power amplifier, neural network DPD, MATLAB, OFDM, ACPR, nonlinear distortion, 5G/6G

УДК 621.39

ГРНТИ 49.33.29

АНАЛИЗ СТАНДАРТА IEEE 802.11BN И ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ПОСТРОЕНИИ СОВРЕМЕННЫХ БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЕЙ СВЯЗИ

С. Е. Крылов, А. И. Парамонов

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В настоящее время происходит стремительный рост количества потребительских устройств, использующих беспроводную связь по стандарту IEEE 802.11 (Wi-Fi) для передачи данных в Интернет и в локальных сетях (LAN). Однако вместе с количеством устройств ежегодно растет трафик и изменяется поведение устройств в сети, к чему беспроводные сети, используемые сегодня – оказываются зачастую не готовы по ряду причин.

Mesh-сети, Wi-Fi, беспроводные сети

Введение

Современные сети связи переживают стремительный рост числа устройств, использующих беспроводные сети стандарта IEEE 802.11, а также изменение профиля использования данных сетей. Беспроводные сети, широко применяемые сегодня – зачастую работают по стандартам IEEE 802.11ax (Wi-Fi 6) или IEEE 802.11be (Wi-Fi 7) и опираются в основном на алгоритмы передачи данных, которые были заложены еще в одних из первых реализаций стандартов. Целью данной работы является рассмотрение разрабатываемого в данный момент стандарта IEEE 802.11bn (Wi-Fi 8), изменений, которые привносятся в рамках данного стандарта, а также влияние данных изменений на качество обслуживания в беспроводных сетях связи.

802.11 – это серия стандартов, разработанных Институтом инженеров электрических и электронных инженеров (IEEE) для беспроводных сетей локальной области (WLAN). Стандарт 802.11 определяет протоколы и спецификации для беспроводной связи между устройствами, такими как компьютеры, смартфоны, планшеты и другие устройства.

Основные стандарты, используемые сегодня:

1. 802.11ac (Wi-Fi 5): принят в 2014 году; максимальная скорость до 6.7 Гбит/с в диапазоне 5 ГГц; максимальная ширина канала до 160 МГц при использовании 8 пространственных потоков (MIMO 8x8).

2. 802.11ax (Wi-Fi 6): принят в 2019 году; максимальная скорость до 9.6 Гбит/с в диапазоне 5 ГГц; максимальная ширина канала до 160 МГц при использовании 8 пространственных потоков (MIMO 8x8).

3. 802.11be (Wi-Fi 7): принят в 2024 году; максимальная скорость до 23 Гбит/с в диапазоне 6 ГГц; максимальная ширина канала до 320 МГц при использовании 8 пространственных потоков (MIMO 8x8).

1. Существующие проблемы

Исходя из приведенных данных видно, что с каждым последующим поколением беспроводных сетей связи – наблюдался также рост максимальной скорости передачи данных и увеличивалась ширина канала, которую использует точка доступа. Однако данный рост был сопряжен с рядом проблем, которые не разрешались долгое время, а именно:

1. Загруженность диапазонов 2.4 ГГц и 5 ГГц. Несмотря на то, что появившийся в стандарте 802.11n диапазон 5 ГГц решал проблему ширины канала при ширине канала до 40 МГц, сейчас развитие стандартов привело к росту ширины канала вплоть до 320 МГц, что вновь привело к нехватке радиоресурса. Стандарт 802.11ax был расширен и началось использование диапазона 6 ГГц, который в силу своего низкого распространения позволял временно решить проблему.

2. С ростом количества устройств, подключенных к беспроводным сетям Wi-Fi, а также распространением данного стандарта в домашних и корпоративных сетях – появилась проблема зашумленности, при которой точки доступа Wi-Fi и прочие устройства, работающие на тех же частотах – создают друг для друга помехи, препятствующие корректной работе.

3. Все сети Wi-Fi были зависимы от самых медленных устройств в сети и таким образом современные и быстрые устройства ограничивались по скорости передачи данных из-за необходимости обслуживания более медленного устройства.

Для решения фундаментальных проблем прошлых стандартов Wi-Fi – в данный момент разрабатывается новый стандарт – IEEE 802.11bn (Wi-Fi 8). Главной особенностью данного стандарта является обеспечение стабильности ключевых характеристик беспроводных сетей.

2. Анализ особенностей стандарта 802.11bn

Далее приведены особенности и технологии нового стандарта IEEE 802.11bn.

DRU (Distributed tone Resource Units – распределенные тональные ресурсные блоки) [1]

Устройства в беспроводной сети выделяют для сигналов восходящего трафика более широкий канал, повышая общую мощность передачи. DRU улучшает со стороны точки доступа прием сигналов от маломощных или значительно удаленных устройств. Благодаря этому повышается надежность передачи как эластичных, так и потоковых данных.

ELR (Enhanced Long Range – Улучшенная дальность действия)

Более надежная структура пакетов и метод кодирования улучшает качество связи на периферии зоны покрытия сети. Устройства остаются стабильно подключенными даже на значительном удалении от точки доступа. Это особенно актуально для чердачных помещений, гаражей и наружных камер видеонаблюдения.

UEQM (Unequal Modulation – Неравномерная модуляция)

Каждый MIMO-поток может работать со своей оптимальной скоростью, которую он способен поддерживать в данных условиях вместо установления одинакового режима для всех потоков. Пространственный поток со слабым сигналом больше не тормозит потоки с уверенным сигналом, следовательно устройства получают в целом более согласованный скоростной режим при переменном качестве сигнала.

MCS (New Modulation and Coding Schemes – Новые индексы модуляции и кодирования)

Когда уровень принимаемого сигнала снижается, например, устройство перемещается дальше от точки доступа, скорость передачи данных может резко снизиться, что приведет к задержкам или избыточной буферизации. Wi-Fi 8 вводит новые уровни MCS, которые обеспечивают более плавные изменения скорости передачи данных. Это обеспечивает более стабильные соединения и согласованные скорости во всей зоне покрытия сети.

DSO (Dynamic Sub-band Operation – Динамическая работа поддиапазонов)

В настоящее время устройства с относительно низкой пропускной способностью могут, тем не менее, занимать весь диапазон точки доступа, расходуя емкость сети, что, в свою очередь, может привести к ее перегрузке. DSO позволяет точке доступа назначать каналы более точно, на основе фактической пропускной способности каждого устройства. Это позволяет обоснованно расходовать радиоресурсы точек доступа и подключенных к ним устройств и практически не допускать снижения общей пропускной способности сети.

NPCA (Non-Primary Channel Access, Доступ к непервичному каналу)

Сегодня большинство устройств могут передавать сигнал только на главный канал точки доступа, даже если соседние каналы совершенно свободны. NPCA позволяет устройствам использовать дополнительные подканалы, когда главный занят. Это помогает избежать коллизий и «пробок», уменьшает задержки и поддерживает высокую скорость соединения даже при высокой загрузке сети.

Бесшовный роуминг

Ранее, точки доступа весьма плохо обеспечивали переключение клиентов между собой. Исключением являлись ячеистые (Mesh) сети. В новом стандарте IEEE 802.11bn ожидается скорость переключения клиентов близкая к бесшовной, что позволит строить большие беспроводные сети, внутри которых трафик практически не будет прерываться при переходе с одной точки доступа на другую.

Co-BF (Coordinated Beamforming, Координированное формирование луча) и Co-SR (Coordinated Spatial Reuse, Координированное пространственное повторное использование)

В Wi-Fi 8 точки доступа синхронизируются и точно направляют сигнал, подстраивая мощность передатчика для снижения эффектов перекрытия. Это взаимодействие позволит сохранить низкий уровень помех и стабильную скорость передачи данных в Mesh-конфигурациях или домовых сетях с несколькими точками доступа.

EDCA (Enhanced Distributed Channel Access, Улучшенный распределенный доступ к каналу)

До Wi-Fi 8 QoS (качество обслуживания) часто означало простые приоритеты – например, игры могли иметь преимущество, пока другие соеди-

нения ждали. Wi-Fi 8 совершенствует EDCA с помощью более умной координации между точкой доступа и клиентом, благодаря чему сеть одновременно дает каждому сценарию то, что ему нужно: низкую задержку для игр, плавную трансляцию для фильмов и стабильную пропускную способность для загрузок.

3. Выводы и перспективы

Исходя из вышеперечисленного, можно отметить, что над новым стандартом беспроводных сетей была проделана большая работа по доработке основных недостатков технологии. [2] Новый стандарт беспроводных сетей позволит использовать сервисы, чувствительные к задержкам без риска ухудшения показателей вследствие помех в беспроводной сети, а также с сохранением качества сервиса на всем покрытии беспроводной сети. Достоверно оценить работу обновленного стандарта мы сможем, когда в продаже появятся первые потребительские точки доступа стандарта IEEE 802.11bn (Wi-Fi 8).

[3] На данный момент остается вопрос, насколько данный стандарт будет совместим со старыми устройствами, которые до сих пор используют старые алгоритмы передачи данных CSMA/CA и DCF, а также насколько он будет оптимизирован для работы устройств Интернета вещей. Для Интернета вещей отдельно создан стандарт 802.11ah (HaLow), который нацелен на работу на частотах около 1 ГГц, однако на рынке довольно мало устройств, которые работают по данному стандарту и все же больше нацелены на традиционные беспроводные сети.

Рассмотренные выше новшества стандарта 802.11bn влияют на показатели функционирования сетей, следовательно, они также отражаются на подходах к их планированию и проектированию при построении корпоративных сетей. Новые возможности также должны отразиться на функционировании «домашних» точек доступа и подключенных к ним устройств, что может потребовать разработки методов и рекомендаций по их настройке и управлению для повышения эффективности сети в условиях высокой плотности пользователей.

Список используемых источников

1. Wi-Fi 8: всегда на связи (2026). // URL: https://www.nix.ru/computer_hardware_news/hardware_news_viewer.html?id=218104 (дата обращения: 20.04.2026).

2. Intel Corporation (C. Cordeiro), Wi-Fi 8: connectivity for the AI era. 2025. С. 3-5.
3. Чего не ждать от 802.11ax? (2018). // URL: <https://habr.com/ru/articles/348472/>
(дата обращения: 16.04.2026).

**ANALYSIS OF THE IEEE 802.11BN STANDARD AND TECHNOLOGY
APPLICATIONS IN THE DEPLOYMENT OF MODERN WIRELESS
COMMUNICATION NETWORKS**

Krylov S., Paramonov A.

The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunication

Consumer devices using the IEEE 802.11 (Wi-Fi) standard for wireless data transfer over the internet and between local area networks (LANs) are rapidly growing. However, along with the number of devices, traffic is growing annually, and network behavior is changing, which is why today's wireless networks are often unprepared for a number of reasons.

Key words: mesh networks, Wi-Fi, wireless networks

УДК 004.8
ГРНТИ 28.23.29

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОБЛЕГЧЕННЫХ МОДЕЛЕЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В СЕТЯХ СВЯЗИ: АРХИТЕКТУРА, МАСШТАБИРОВАНИЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ СЦЕНАРИИ ПРИМЕНЕНИЯ

Т. В. Лаптева, А. С. А. Мутханна

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В статье рассматривается применение легковесных моделей искусственного интеллекта в сетях связи настоящего и следующего поколения. Анализируются архитектурные решения, которые позволяют интегрировать интеллектуальные вычисления в периферийные устройства, такие как базовые станции, шлюзы и контроллеры. Описаны практические сценарии использования: автоматизация управления RAN, прогнозирование трафика, обнаружение вторжений в реальном времени, нейросетевые приемники на физическом уровне и федеративное обучение. Обсуждаются основные вызовы и перспективы перехода к архитектуре AI-Native 6G, где легковесные модели становятся встроенным элементом сетевых протоколов.

облегченные модели искусственного интеллекта, сети связи 5G/6G, прогнозирование трафика, федеративное обучение

Традиционная телекоммуникационная архитектура строилась вокруг централизованных облачных вычислительных мощностей. Однако развитие сетей 5G и перспектива появления 6G значительно влияют на пропускную способность и требования к задержкам, что меняет расстановку приоритетов в этой области. Легковесные модели (Lightweight AI) интегрированные непосредственно в сетевое оборудование, такое как базовые станции, шлюзы и контроллеры, выполняют интеллектуальные вычисления на периферии сети в непосредственной близости от источников создания данных, что способствует сокращению задержек при передаче данных и повышению оперативности принятия решений. В настоящей работе приведен сравнительный анализ Lightweight AI, а также возможные дальнейшие перспективы их применения в архитектуре современных и будущих сетей связи.

Легковесные ИИ-модели в сетях связи: что это и зачем они нужны?

Легковесная модель в сетях связи, это модель искусственного интеллекта, которая прошла многомерную оптимизацию алгоритмов для обеспе-

чения высокой производительности с минимальными вычислительными и энергетическими затратами. В отрасли телекоммуникаций применяется ряд решений:

- Small Language Models (SLM) и Tiny Language Models (TLM), это модели количество параметров которых варьируется от нескольких десятков миллионов до двух миллиардов, работающие без применения аппаратного ускорения графического процессора. Решение Tiny Machine Learning (TinyML) реализует запуск модели на микроконтроллерах с объемом памяти менее 1 МБ [1].
- Model Driven Neural Networks, это модель, в архитектуру которой встроены предварительные знания о предметной области структуры сети, например о физике канала, что дает значительное снижение количества параметров (в 396 раз по сравнению с классическими нейросетевыми решениями) [2]. Такой подход при обучении модели снижает необходимость в большом количестве данных и повышает ее эффективность.
- Knowledge Distillation и Network Compression, которые применяются в том числе для радиочастотной идентификации (Radio Frequency Identification, RFFI) в сетях 6G, основаны на методах сжатия нейронных сетей. Данный подход подразумевает передачу знаний от крупной «обучающей» модели к компактной «обучаемой» в совокупности с другими методами сжатия нейронных сетей, такими как обрезка, квантование, тензорное разложение и др. [3].

Основные направления использования Lightweight AI

Lightweight AI успешно решают задачи, которые ранее считались невыполнимыми для распределенной архитектуры. Наиболее активные исследования их применения ведутся в следующих направлениях:

1. Управление и автоматизация сети (5G/6G оркестрация).

Переход к сетям, которые настраиваются сами (Self-Organizing Networks, SON), требует постоянного мониторинга очень большого количества параметров. Большие языковые модели (Large Language Models, LLM) размещенные локально на сетевом оборудовании в непосредственной близости к границе сети и дополненные механизмом извлечения данных из внешних источников (Retrieval-Augmented Generation, RAG) позволяют оператору производить настройку сети на естественном языке. В качестве примера можно привести использование квантованной модели LLaMA-3

объемом 8 бит и сжатой до 4 бит, которая генерирует конфигурации, не передавая конфиденциальные данные во внешние API [4].

2. Оптимизация RAN (сети радиодоступа) и трафика.

Это направление является одним из самых ресурсоемких для прогнозирования нагрузки в режиме реального времени. Использование облегченных нейронных сетей, архитектура которых основана на сетях с «долгой краткосрочной памятью» (Long Short-Term Memory, LSTM) и методы автоматизированного поиска оптимальной архитектуры нейронной сети (Neural Architecture Search, NAS), для решения конкретных задач машинного обучения применяются, позволяют автономно активировать или деактивировать сетевые ячейки.

Такие модели демонстрируют коэффициент детерминации $R^2 \approx 0.91–0.93$ для обычного трафика и снижают вычислительную сложность на 70–75 % по сравнению с тяжелыми аналогами [5]. Для прогнозирования задержек в 5G применяются мультислойные перцептроны (Multi-layer Perceptron, MLP), которые на сложных тестах производительности превосходят более ресурсоемкие решения по метрике среднеквадратичной ошибки (Mean Squared Error, MSE) [6].

3. Безопасность периферии: обнаружение вторжений (Intrusion Detection System, IDS) на месте.

В этом направлении использования легковесные модели демонстрируют, пожалуй, самые яркие результаты в соотношении точность/ресурсы:

- модель TinyDenseNet, сжатая через квантование и прунинг, занимает менее 30 КБ памяти, обеспечивает точность обнаружения угроз более 99 % и время инференса до 11 мс. [7];
- гибридная модель CNN + ConvNeXt-Tiny, предназначенная для IoT-сетей, при классификации 8 типов атак (от вредоносных ботнетов до DDoS) на реальных датасетах трафика достигает точности 99,63 % [8];
- DistilXIDS. Модель на основе дистиллированного BERT (DistilBERT) выходит на уровень точности более 99 %. При этом критически важна ее «объяснимость» через SHAP-атрибуцию, оценивая какой вклад каждый признак (параметр) вносит в итоговое предсказание модели, что позволяет инженерам доверять решениям ИИ [9].

4. Физический уровень и 6G: нейросетевой приемник.

Здесь легковесные модели внедряются в самые недра сети – в «модемный стек». Модельно-управляемый нейросетевой приемник (model-driven neural receiver) для MU-MIMO, совместимый со стандартами 5G NR, сокра-

щает число операций с плавающей запятой на 66 % и параметров в 396 раз без потери качества приема (даже превосходя классические методы по транспортной блочной ошибке (Transport Block Error Rate, TBLER) [10].

5. Федеративное обучение (Federated Learning, FL).

В сетях связи миллионы устройств генерируют данные, которые нельзя централизовать. Federated Learning позволяет обучать глобальные модели без передачи сырых данных. Для этого создаются специальные TLN, которые децентрализованно обучаются на базовых станциях. Использование стандарта сжатия NNCodec (ISO/IEC) показывает, что можно ужать передаваемый трафик федеративного обучения до 1 % от исходного объема градиентов, обеспечивая практически нулевую потерю точности.

Анализ таблицы 1 говорит о том, что прослеживаются общие тенденции при использовании облегченных AI-моделей. Все модели демонстрируют высокую эффективность при значительном сокращении ресурсов, при этом точность некоторых моделей достигает 99 % или сопоставима с более сложными аналогами.

ТАБЛИЦА 1. Сравнительные данные производительности по видам облегченных моделей искусственного интеллекта

Вид модели	Тип выполняемой задачи	Размер/	Вид модели
NAS LSTM (облегченная версия) [5]	Прогнозирование трафика для O-RAN	Произвольная (подбор NAS)	$R^2 \approx 0.91-0.93$ при снижении вычислительной нагрузки на 75 % [5]
Базовый MLP [6]	Предсказание RTT задержек в 5G	Многослойный перцептрон	Лучший показатель MSE против сложных глубоких сетей [6]
TinyDenseNet [7]	Обнаружение аномалий в 5G	< 30 KB (квантизация + прунинг)	>99 % точность, инференс < 11 мс [7]
ConvNeXt-Tiny + CNN [8]	IDS для IoT	8-классовая классификация	99.63 % точность [8]
Model-Driven Neural Receiver [10]	Физический уровень (MU-MIMO)	Сокращение FLOP на 66 %	Уменьшение количества параметров в 396 раз [10]
iTransformer_Lite (для LEO) [11]	Прогноз трафика для спутников 6G	Легкий Transformer	Уменьшение использования памяти на 57 %, вычислительных ресурсов на 2,3 % [11]

Проблемы и вызовы внедрения

Достижения и открытия в исследованиях Lightweight AI не отменяют сложностей внедрения моделей в реальную сеть. А именно:

1. Гетерогенность оборудования. Сеть оператора – это сотни типов устройств с разными чипами (ARM, x86, специализированные NPU). Поиск единого формата модели или компиляции в режиме реального времени под конкретный блок остается открытой задачей. Об этом, в частности, говорится в программе IEEE Wireless Communications по TinyML для 6G. [12].

2. Концептуальный дрейф (Concept Drift). Сетевой трафик по своей природе не статичен: новые приложения (например, для создания генеративного видео) формируют паттерны, которые модель не могла выявить на этапе первоначального обучения. Это требует внедрения механизмов онлайн-обучения и адаптации непосредственно на устройстве.

3. Интеграция с O-RAN. Открытые интерфейсы интеллектуального контроллера сети радиодоступа (RIC) изначально разрабатывались для xApps и rApps, однако сертификация и разрешение конфликтов между десятками ИИ-агентов, одновременно работающих в одной соте, например алгоритмами энергосбережения и планировщиками QoS), по-прежнему представляют собой сложную инженерную задачу [13].

Перспективы дальнейшего развития

Мы наблюдаем движение в сторону концепции AI-Native 6G, в которой каждый узел обработки сигнала и протокол верхнего уровня оснащены встроенными облегченными моделями искусственного интеллекта. Особый интерес представляет направление Agentic TinyML, в рамках которого компактные модели обретают признаки «Агентного ИИ» и способность самостоятельно принимать решения о хэндовере (переключении между сотами) или маршрутизации без обращения к центральному облаку. Более того, появление периферийного генеративного ИИ, работающего на обычном Raspberry Pi со скоростью 5–12 токенов в секунду [14], открывает путь к полностью автономным сетевым агентам, которые могут в режиме реального времени создавать собственные скрипты для настройки. Таким образом, в ближайшие 3–5 лет легковесные ИИ-модели превратятся из вспомогательного инструмента в основу сетей связи.

Заключение

Легковесные ИИ-модели – это не вынужденный компромисс между точностью и быстродействием, а новая парадигма сетевого инжини-

ринга. Экономия до 70 % вычислительных ресурсов и микросекундные задержки, достигаемые непосредственно на периферии сети, открывают дорогу таким сценариям использования 5G/6G, как тактильный интернет, телеприсутствие и распределенная робототехника, где критичен каждый миллисекундный отклик. Дальнейшее развитие стандартов сжатия (нейронное сетевое кодирование, Neural Network Coding, NNC), методов NAS, ориентированных на конкретные задачи машинного обучения, а также федеративные подходы машинного обучения приближает эпоху, когда нейросеть оставаясь легкой и быстрой в буквальном смысле «мыслит» на собственных устройствах.

Список используемых источников

1. Pirbhulal S., Muzammal M., Abie H. Enabling Secure Edge Intelligence: TinyML-Based Threat Detection in 5G and Future Networks // IEEE Wireless Communications. 2025. Vol. 33, N 2. P. 32–39. DOI: 10.1109/MWC.2025.3641534. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/11314171> (дата обращения: 16.05.2026).
2. Abdollahpour M. et al. A Compute&Memory Efficient Model-Driven Neural 5G Receiver for Edge AI-assisted RAN // arXiv.org. 2025. Дата обновления: 22.10.2025. URL: <https://arxiv.org/html/2508.12892v2> (дата обращения: 16.05.2026).
3. Liu Y., Gao N., Li X., Jin S. Large Language Model Enabled Lightweight RFFI for 6G Edge Intelligence // 2025 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). 2025. P. 1–6. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10978469> (дата обращения: 16.05.2026).
4. Majlesara A. et al. 5G Network Automation Using Local Large Language Models and Retrieval-Augmented Generation // arXiv.org. 2025. 26 Nov. URL: <https://arxiv.org/html/2511.21084v1> (дата обращения: 16.05.2026).
5. Salama A. et al. Poster: Agentic AI meets Neural Architecture Search: Proactive Traffic Prediction for AI-RAN // arXiv.org. 2025. 1 Oct. URL: <https://arxiv.org/html/2510.00851v1> (дата обращения: 16.05.2026).
6. Zinno S. et al. A Lightweight Deep Learning Approach for Latency Prediction in 5G and Beyond // 2025 21st International Conference on Network and Service Management (CNSM). 2025. P. 1–6. URL: <https://dl.ifip.org/db/conf/cnsm/cnsm2025/1571197155.pdf> (дата обращения: 16.05.2026).
7. Pirbhulal S., Muzammal M., Abie H. Enabling Secure Edge Intelligence: TinyML-Based Threat Detection in 5G and Future Networks // IEEE Wireless Communications. 2026. Vol. 33, N 2. P. 32–39. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/11314171> (дата обращения: 16.05.2026).
8. Roshanzadeh F., Barati H., Barati A. Lightweight Intrusion Detection System Using a Hybrid CNN and ConvNeXt-Tiny Model for Internet of Things Networks // arXiv.org. 2025. 7 Sep. URL: <https://arxiv.org/abs/2509.06202v1> (дата обращения: 16.05.2026).
9. Ajayan A., Kirubavathi G., Sarker I.H. DistilXIDS: Efficient, lightweight and explainable transformer-based language model for real-time network intrusion detection // Neurocomputing. 2026. Vol. 668. P. 132398. URL: <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2025.132398> (дата обращения: 16.05.2026).
10. Abdollahpour M., Bertuletti M., Zhang Y., Li Y., Benini L., Vanelli-Coralli A. A Compute&Memory Efficient Model-Driven Neural 5G Receiver for Edge AI-assisted RAN //

arXiv.org. 2025. 22 Oct. URL: <https://arxiv.org/abs/2508.12892v2> (дата обращения: 16.05.2026).

11. Liang Y. et al. Lightweight AI-driven traffic forecasting and shaping for 6G LEO satellite networks // Neurocomputing. 2026. Vol. 666. P. 132226. URL: <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2025.132226> (дата обращения: 16.05.2026).

12. Saleh A. Agentic TinyML for Intent-aware Handover in 6G Wireless Networks / A. Saleh, R. Morabito, S. Tarkoma [et al.] // arXiv.org. 2025. 02 Aug. URL: <https://arxiv.org/abs/2508.09147v1> (дата обращения: 16.05.2026).

13. D4.3 Final Architecture and Evaluation of BeGREEN O-RAN Intelligence Plane, and AI/ML Algorithms for NFV User-Plane and Edge Service Control Energy Efficiency Optimisation: проектный документ / BeGREEN Project. Zenodo, 2025. 12 сент. URL: <https://zenodo.org/records/17161311> (дата обращения: 16.05.2026).

14. Nezami Z. Generative AI on the Edge: Architecture and Performance Evaluation / Z. Nezami, M. Hefeez, K. Djemame, S. A. R. Zaidi. DOI: 10.1109/icc52391.2025.11161569. Текст: электронный // ICC 2025 IEEE International Conference on Communications: материалы конференции. Montreal, QC, Canada, 2025. С. 4595-4602. URL: <https://eprints.whiterose.ac.uk/id/eprint/232968/1>. (дата обращения: 16.05.2026)

USAGE OF LIGHTWEIGHT MODELS OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN COMMUNICATION NETWORKS: ARCHITECTURE, SCALING AND PRACTICAL APPLICATIONS

Lapteva T., Muthanna A.

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

The article discusses the use of lightweight artificial intelligence models in communication networks of the present and next generation. Architectural solutions that enable the integration of intelligent computing into peripheral devices such as base stations, gateways, and controllers are analyzed. Practical use cases are described: automation of RAN management, traffic forecasting, real-time intrusion detection, neural network receivers at the physical level, and federated learning. The main challenges and prospects of the transition to the AI-Native 6G architecture, where lightweight models become an integrated element of network protocols, are discussed.

Key words: *lightweight AI models, 5G/6G communication networks, traffic forecasting, and federated learning*

УДК 654.06
ГРНТИ 28.31.23

МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ОТКАЗОУСТОЙЧИВОСТИ ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРИ ДЕГРАДАЦИИ СИГНАЛОВ ГНСС

А. В. Лейкин, И. П. Плотников

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. Проф. М. А. Бонч-Бруевича

В статье рассматривается проблема обеспечения отказоустойчивости частотно-временного обеспечения критически важных систем Российской Федерации в условиях системного глушения и подмены сигналов глобальных навигационных спутниковых систем. Актуальность исследования обусловлена применением средств радиоэлектронной борьбы для подавления беспилотных летательных аппаратов, что привело к масштабному влиянию на отрасли промышленности, ИТ-сектор, транспорт и рядовых потребителей.

ГНСС, синхронизация, частотно-временное обеспечение, система единого точного времени

В Российской Федерации имеется множество потребителей информации о точном времени, которым необходимо периодически синхронизировать приборы, устройства и системы по эталонным сигналам, несущим информацию о шкале координированного времени Государственного первичного эталона частоты и времени Российской федерации. Точность времени имеет критическое значение в отрасли транспорта, связи, безопасности, обороны, энергетики, наземной и космической навигации и т.д. При отсутствии привязки систем к общей шкале времени неизбежно возникают угрозы с нарушением последовательности выполнения программ, пропажа архивных данных из-за некорректных временных меток, нарушение безопасности доступа к ресурсам, некорректная работа биллинг-систем. Таким образом отсутствие надежного резервного способа получения сигнала точного времени при деградации сигнала глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) создает угрозу критической инфраструктуре Российской Федерации [1].

Целью данного исследования является разработка рекомендаций по обеспечению отказоустойчивости частотно-временного обеспечения критически важных систем Российской Федерации при деградации сигналов ГНСС за счет оценки эффективности методов резервирования и выбора оптимальной архитектуры синхронизации. В следствии чего перед исследованием ставятся задачи анализа существующих атак и воздействий на сигналы

ГНСС, оценки эффективности методов резервирования и изучение опыта внедрения резервирования.

Системой единого точного времени называется комплекс технических средств, обеспечивающий периодическую передачу цифровой информации о значении текущего времени от эталонного источника ко всем сетевым элементам, с целью синхронизации их внутренних часов [2].

На текущий момент потребители ориентированы на получение сигналов частотно-временного обеспечения, передаваемых ГНСС. Отсутствие резервного способа получения сигнала точного времени может привести к критическим последствиям для потребителей. Среди главных угроз распространения сигналов точного времени стоит отметить преднамеренные или случайные воздействия: деградация, подмена и глушение сигнала ГНСС.

В Российской Федерации подмена и глушение сигналов точного времени стали системным явлением. Применение средств радиоэлектронной борьбы для подавления беспилотных летательных аппаратов в последнее время вынуждает потребителей сигналов точного времени искать способы резервирования и нормализации работы серверов точного времени. Инфраструктура средств радиоэлектронной борьбы охватывает крупные мегаполисы и приграничные зоны, что оказывает масштабное влияние на отрасли промышленности, ИТ-сектор, транспорт и рядовых потребителей.

Глушение (jamming) – создание радиопомех, мешающих устройствам принимать сигналы спутниковой навигации. При глушении приемник теряет возможность корректно определять координаты, скорость и направление движения, из-за чего навигационные системы начинают работать нестабильно или полностью перестают функционировать. Глушение используется как в ведомственных, так и в специальных системах радиоэлектронной борьбы. Так же незаконных сценариях: от подавления трекеров транспорта до атак на беспилотники и навигационную инфраструктуру. Особенно чувствительны к таким помехам автономные системы, зависящие от спутникового позиционирования.

Подмена (spoofing) – атака подмены сигналов ГНСС. Для проведения атаки подмены злоумышленник передает более мощный сигнал, в котором изначально содержатся корректные данные спутника, после чего происходит постепенное отклонение данных, что приводит к некорректной работе оборудования.

Существует ряд признаков, по которым можно выявить получение потребителем некорректного сигнала ГНСС. Сигналы спутников ГНСС, достигающие поверхности Земли, относительно слабые. Сигнал от злоумыш-

ленника, как правило, значительно мощнее, поэтому аномально высокий уровень принимаемого сигнала может указывать на атаку подмены. В обычных условиях сигналы от различных спутников ГНСС имеют существенно различающиеся уровни мощности. Большинство стандартных эмуляторов способны генерировать сигналы до 24 спутников, причем с одинаковой мощностью для каждого. Равномерный уровень сигнала от всех спутников так же может свидетельствовать об осуществлении атаки подмены. Подмененные сигналы ГНСС отличаются крайне низким уровнем шума. При фиксации приемником сигнала с минимальными шумовыми помехами, высока вероятность, что это поддельный сигнал. Каждый спутник ГНСС имеет уникальный идентификатор. На определенной точке земной поверхности доступен только конкретный набор спутников. Если потребитель регистрирует сигнал от спутника с некорректным для данной географической точки номером, это свидетельствует о подделке сигнала.

Существуют методы обеспечения отказоустойчивости частотно-временного обеспечения при деградации сигналов ГНСС: такие как GNSS-holdover; методы подавления помех в приемниках; аппаратные решения, позволяющие не зависеть от одной группы спутников; архитектурные решения, направленные на резервирование источников точного времени. Сравнение данных методов представлено далее (табл. 1).

ТАБЛИЦА 1. Сравнение способов получения сигналов точного времени

Метод	Точность	Автономность	Стоимость	Сложность внедрения	Области применения
GNSS-holdover	1 мкс в сутки	часы-дни	низкая	низкая	небольшие сети
Атомные часы (цезий, рубидий)	1 нс в сутки	недели-месяцы	высокая	средняя	финансовый, энергетический сектор, центры обработки данных
ВОЛС	субнаносекунды	неограниченно	средняя-высокая	высокая (прокладка кабельной линии)	телекоммуникации, транспорт, мегаполисы
Гибридная система	оптимальная	максимальная	высокая	высокая	объекты критической инфраструктуры

Существующие современные сервера времени сочетают в себе функции распознавания некорректных сигналов времени и автоматически переводятся

в автономный режим, поддерживая корректное время внутренним осциллятором. Рекомендация МСЭ-T G.811 допускает отклонение 1 мкс в сутки, чего может хватить на непродолжительное воздействие злоумышленников, так как при накоплении отклонения возможно нарушение технологического процесса [3].

Архитектура с атомными эталонами времени, такими как цезиевый, рубидиевый, водородный, позволяет не зависеть от сигналов ГНСС продолжительное время. Данная архитектура применяется в критически важных системах финансовых, энергетических, телекоммуникационных.

Резервирование сигналов точного времени по оптоволоконной линии – это аппаратный метод обеспечения непрерывности временной синхронизации за счет передачи эталонного времени по волоконно-оптической линии в связи вместо или в дополнении к ГНСС. Данный метод поддерживает протоколы IRIG-B, PTP, NTP, что обеспечивает субнаносекундную точность передачи. При использовании данного метода резервирования требуется переключение как на приеме, так и на передаче сигнала, необходимо согласовать работу основного и резервного каналов. Из преимуществ данного метода можно отметить полную автономию при деградации сигнала ГНСС, защита от средств радиоэлектронной борьбы и субнаносекундная синхронизация. Данный метод получил распространение в телекоммуникациях, в частности в синхронизации базовых станций сетей подвижной связи. Метод синхронизации с помощью волоконно-оптической линии ограничен необходимостью прокладки оптической линии между узлами, длиной оптической линии и географической распределенностью потребителей сигналов точного времени.

В Российской Федерации существует одна из самых протяженных линий оптоволоконной сети связи – единая магистральная сеть связи ОАО «Российские железные дороги» с достаточно совершенной собственной системой тактовой сетевой синхронизации. Система тактовой сетевой синхронизации магистральной цифровой сети связи была построена в 1999-2002 гг. АО «Компания Транстелеком». Данная система представляет собой разветвленную однородную сеть формирования, доставки и распределения синхросигналов, наложенную на транспортную сеть волоконно-оптических линий передачи. В состав сети входят 4 первичных эталонных генератора распределенных географически, 2 самостоятельные зоны синхронизации, имеющие свои эталонные источники синхросигналов, 43 вторичных задающих генератора и сотни мультиплексоров систем передачи цифровой иерархии, система управления сетью транспортной сетевой синхронизацией. Изначально проектировалась и строилась как независимая в своем развитии от систем других операторов и может решать задачи временной синхронизации.

ции для обработки данных в режиме реального времени на создаваемой сети связи значительной протяженности. Возможность подключения существует практически на каждой железнодорожной станции. АО «Компания Транстелеком» оказывает услуги транспортной сетевой синхронизации операторам связи и корпоративным клиентам для обеспечения стабильной работы сетей и телекоммуникационных узлов [4].

Зависимость от ГНСС является критической уязвимостью для российской инфраструктуры в условиях системного применения средств радиоэлектронной борьбы. GNSS-holdover недостаточно для продолжительных атак, а атомные эталоны времени хоть и обеспечивают достаточную автономность, но требуют капитальных вложений. Система тактовой сетевой синхронизации АО «Компания Транстелеком» является примером отказоустойчивой инфраструктуры, доступной для потребителей. Рекомендуется гибридный подход для формирования сигналов точного времени: сочетание атомных часов и оптоволоконного резервирования.

Список используемых источников

1. Колтунов М. Н., Леготин Н. Н., Шварц М. Л. Сетевая синхронизация в системах связи. М.: Syrus systems, 2007. ISBN 978-5-85493-104-4.
2. Лихтциндлер Б. Я. Синхронизированные по времени сети Ethernet. М.: Горячая линия – Телеком. 2024. 92 с. ISBN 978-5-9912-1107-9.
3. ГОСТ Р 71148-2023. Требования по построению систем синхронизации сетей связи: сетей связи с коммутацией каналов, сетей связи с коммутацией пакетов. М.: ИС «Меганорм», 2023. 24 с.
4. Рыжков А. В. Частотно-временное обеспечение в сетях электросвязи. М.: Горячая линия – Телеком, 2018. 90 с. ISBN 978-5-9912-0732-4.

Статья представлена научным руководителем, доцентом кафедры ИКС СПбГУТ, кандидатом технических наук А. А. Гребеницковой.

METHODS OF ENSURING FAULT TOLERANCE OF FREQUENCY TIME SUPPORT IN EVENT OF GNSS SIGNAL DEGRADATION

Leykin A., Plotnikov I.

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

The article addresses the problem of ensuring resilience of frequency-time support for critical systems of the Russian Federation under conditions of systematic jamming and spoofing of global navigation satellite system signals. The relevance of the study is caused by the use of electronic warfare means for suppressing unmanned aerial vehicles, which has led to large-scale impact on industrial sectors, the IT sector, transport, and ordinary consumers.

Key words: GNSS, synchronization, frequency-time support, precision time support system

УДК 004.7
ГРНТИ 49.33.29

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ QOS НА ОСНОВЕ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

В. Д. Михайлов, М. А. Маколкина

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В статье рассматривается задача проактивного управления качеством обслуживания в современных сетях, построенных по принципу программно-конфигурируемых сетей. Предложена гибридная модель машинного обучения, объединяющая ансамблевые алгоритмы и рекуррентную нейронную сеть LSTM, которая способна с высокой точностью предсказывать ключевые метрики QoS на основе сетевой телеметрии. Основное внимание уделено вопросам практической адаптации модели к динамическим условиям реальных сетей, интеграции в контур управления облачными и SDN-инфраструктурами, а также оценке эффективности проактивного масштабирования ресурсов.

качество обслуживания, программно-конфигурируемые сети, машинное обучение, LSTM, проактивное управление

Введение

Современные распределенные приложения требуют строгого соблюдения показателей качества обслуживания. Традиционные подходы к управлению сетью, основанные на реактивных пороговых правилах, срабатывают только после того, как ухудшение QoS уже произошло. Результатом являются задержки, потери пакетов и снижение пропускной способности у пользователей, что ведет к нарушению SLA и финансовым потерям. Переход к проактивному управлению с перераспределением ресурсов до наступления перегрузки, является актуальной задачей, решаемой с помощью методов машинного обучения.

Программно-конфигурируемые сети предоставляют платформу для реализации подобных интеллектуальных систем благодаря централизованному контроллеру, обладающему глобальной видимостью сети и способностью динамически изменять маршруты и политики. Интегрировав SDN с моделями машинного обучения, с которыми уже проведена работа по анализу исторических данных сетевой телеметрии, можно построить предиктивный контур, который заранее предсказывает вероятные проблемы и ини-

цирует упреждающие действия без каких-либо действий со стороны оператора.

В данной статье описывается создание и практическая апробация гибридной модели прогнозирования QoS, которая объединяет несколько алгоритмов машинного обучения для достижения высокой точности.

Технология SDN отделяет плоскость управления от плоскости передачи данных, сосредотачивая логику маршрутизации и обработки трафика на центральном контроллере [1]. Контроллер получает статистику от всех коммутаторов и может в реальном времени изменять правила обработки потоков, что предоставляет возможности для реализации замкнутого цикла управления. Схема замкнутого цикла управления представлена на рисунке 1.



Рис 1. Замкнутый цикл управления

В предлагаемой системе контроллер SDN выступает не только как источник данных о состоянии, но и как исполнительный механизм, реализующий команды проактивного масштабирования или меняющий политики маршрутизации на основе прогнозов машинного обучения. Таким образом подход позволяет сократить время реакции на потенциальные инциденты и избежать характерного для реактивных систем запаздывания, в случае которого ресурсы выделяются уже после того, как пользователи ощутили понижение качества.

Для решения задачи прогнозирования выбрана гибридная архитектура, комбинирующая ансамблевые методы и рекуррентные нейронные сети. Выбор обусловлен разнородностью сетевых данных, присутствуют мгновенные снимки состояния и важные временные тренды и циклы [2].

В качестве первого уровня используются три мощных ансамблевых метода:

- Random Forest обеспечивает устойчивость к шуму и переобучению, хорошо интерпретируется и служит надежной базой [3].
- Gradient Boosting последовательно исправляет ошибки предыдущих деревьев, эффективно моделируя сложные нелинейные зависимости.
- XGBoost добавляет регуляризацию и оптимизирован для работы с пропущенными значениями, что важно при нестабильной телеметрии.

Каждый из представленных алгоритмов обучается на окне исторических данных, предсказывая значение интегрального показателя QoS в ближайший временной интервал.

Параллельно обучается нейронная сеть с долгосрочной памятью. Ее задача выражается в улавливании долгосрочных зависимостей, которые не всегда очевидны для деревьев решений.

Выходы трех базовых моделей и LSTM объединяются метамоделью, что является еще одним экземпляром градиентного бустинга, который обучается взвешивать предсказания нижнего уровня. Стекинг позволяет нивелировать слабости отдельных алгоритмов и добиться более стабильного и точного прогноза, чем любой из них по отдельности.

Для объективного сравнения моделей и выбора наилучшей необходимо опираться на количественные метрики. В задачах регрессионного прогнозирования QoS наиболее распространены следующие показатели.

Среднеквадратичная ошибка основной выбор стандартный выбор для градиентного бустинга и нейронных сетей. Формула дает возможность упрощения процессов оптимизации, но делает саму модель более уязвимой к испорченным результатам обучения за счет аномального поведения сетей.

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$$

Средняя абсолютная ошибка в качестве loss-функции менее подвержена влиянию выбросов, но ее градиент постоянен, что замедляет сходимость вблизи оптимума. Компромиссом служит функция потерь Хьюберта, которая ведет себя как MSE при малых ошибках и как MAE при больших [4].

Параметр δ задает порог, после которого применяется линейный рост штрафа. Данная формула полезна в сетях с нестабильной телеметрией, где возможны единичные аномальные скачки метрик.

$$L_{\delta}(y, \hat{y}) = \begin{cases} \frac{1}{2}(y - \hat{y})^2, & \text{если } |y - \hat{y}| \leq \delta \\ \delta|y - \hat{y}| - \frac{1}{2}\delta^2, & \text{иначе} \end{cases}$$

В задачах прогнозирования временных рядов также применяется квантильная регрессия, позволяющая строить не точечный прогноз, а интервал предсказания. Использование нескольких квантилей создает оценку неопределенности прогноза, что позволяет принимать решения на основе верхней границы ожидаемой задержки, резервируя ресурсы с запасом.

$$L_{\tau}(y, \hat{y}) = \begin{cases} \tau \cdot (y - \hat{y}), & \text{если } y \geq \hat{y} \\ (1 - \tau) \cdot (y - \hat{y}), & \text{иначе} \end{cases}$$

Функции потерь и метрик оценивания являются самым значимым этапом настройки модели под заданную сетевую среду и требования. Формальные критерии дают возможность автоматизировать выбор лучшей архитектуры и соответственно параметров архитектуры.

Внедрение системы в не эмулированную сеть влечет за собой дополнительные задачи, которые необходимо решить: большой масштаб, неоднородность оборудования, шум в разнородных данных телеметрии, изменчивость трафика. Для решения подобных возникающих проблем внедрения созданы некоторые механизмы адаптации.

Модель в контейнере разворачивается вблизи SDN-контроллера или Kubernetes-кластера. Далее прогнозы передаются в модуль принятия решений, сравнивающий ожидаемые значения метрик с порогами SLA. В случае, когда прогнозируется выход за допустимые границы значений, автоматически запускаются следующие процедуры: масштабирование микросервисов, изменение маршрутов трафика, включение резервных каналов или ограничение низкоприоритетного трафика.

В реальной сети характер трафика со временем будет изменяться с добавлением новых микросервисов и сезонными колебаниями. Для поддержания актуальности модели необходимо заложить механизм периодического дообучения на свежих данных. Исторические данные накапливаются в хранилище временных рядов и в зависимости от выставленной частоты обновления запускается переобучение модели в фоновом режиме. Новая версия

проходит автоматическую валидацию, и при улучшении метрик, бесшовно заменяет старую.

Телеметрия реальных сетей часто содержит аномальные выбросы или пропуски из-за перегрузки каналов управления. На этапе предобработки применяется фильтрация скользящим медианным окном и интерполяция пропусков. Пример фактической архитектуры сети для реализации подхода представлен на рисунке 2.

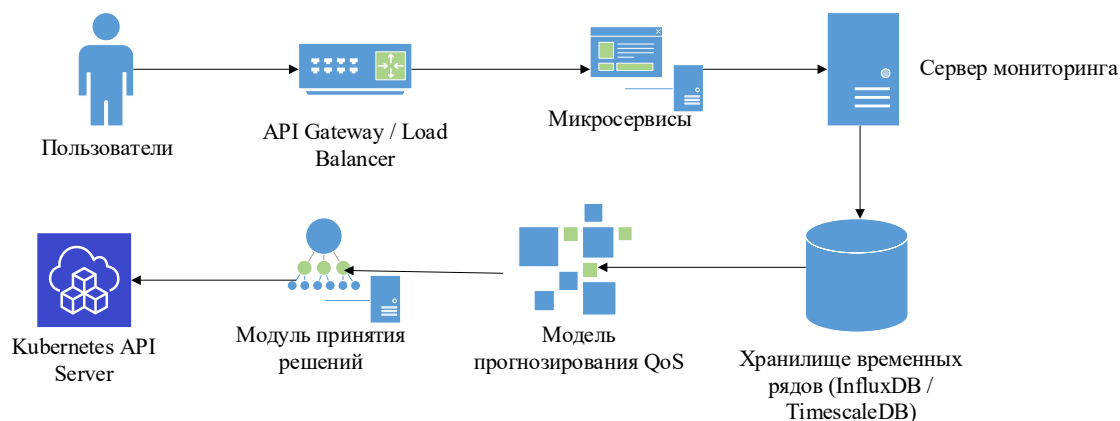


Рис. 2. Архитектура сети

В работе представлена гибридная модель прогнозирования QoS, объединяющая ансамблевые методы и LSTM. Пилотная интеграция в реальный контур управления подтвердила способность системы проактивно предотвращать деградацию сервиса.

Дальнейшие исследования направлены на расширение набора учитываемых параметров и использование графовых нейронных сетей для учета топологии связей между сервисами.

Список используемых источников

1. Zmysłowski D., Kelner J. M. Correlational analysis in QoS parameter assessment for 5G emerging networks in Poland // 2023 Signal Processing Symposium (SPSymposium). Karpacz, Poland, 2023. P. 226–229. DOI: 10.23919/SPSymposium57300.2023.10302684.
2. Huang X., Cui Y., Chen Q., Zhang J. Joint task offloading and QoS-aware resource allocation in fog-enabled Internet-of-Things networks // IEEE Internet of Things Journal. 2020. Vol. 7. N 8. P. 7194–7206.
3. Foukas X., Patounas G., Elmokashfi A., Marina M. K. Network slicing in 5G: Survey and challenges // IEEE Communications Magazine. 2017. Vol. 55. N 5. PP. 94–100. DOI: 10.1109/MCOM.2017.1600951.
4. TS 123 107 – V18.0.0. Digital cellular telecommunications system (Phase 2+) (GSM); Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); LTE; Quality of Service (QoS) concept and architecture (3GPP TS 23.107 version 18.0.0 Release 18) // 3GPP/ETSI. 2024. URL: https://www.etsi.org/deliver/etsi_TS/123100_123199/123107/18.00.00_60/ts_123107v180000p.pdf (дата обращения: 05.05.2026).

MACHINE LEARNING-BASED QOS PREDICTION

Makolkina M., Mikhailov V.

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

This article examines the problem of proactive quality of service management in modern software-defined networks. A hybrid machine learning model combining ensemble algorithms and an LSTM recurrent neural network is proposed. It is capable of highly accurate prediction of key QoS metrics based on network telemetry. The focus is on practical adaptation of the model to the dynamic conditions of real networks, integration into the management loop of cloud and SDN infrastructures, and evaluating the effectiveness of proactive resource scaling.

Key words: *quality of service, software-defined networks, machine learning, LSTM, proactive management*

УДК 004.93

ГРНТИ 49.33.29

АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ОБСЛУЖИВАНИЯ ДОПОЛНЕННОЙ РЕАЛЬНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ

М. А. Маколкина, В. А. Трухин

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Технологии дополненной реальности стремительно развиваются, но их успех полностью зависит от незаметного для пользователя слияния цифрового и физического миров. Для безупречной работы AR недостаточно просто быстрого интернета – система должна мгновенно и точно понимать положение человека в пространстве. Объединение сетевых параметров с методами компьютерного зрения позволяет создать алгоритм сквозной оценки качества обслуживания. Анализируя стабильность трекинга, задержки обработки кадров и ошибки позиционирования объектов в реальном времени, такой подход помогает вовремя находить скрытые сбои и автоматически оптимизировать систему для плавного и комфортного погружения.

дополненная реальность, качество обслуживания, QoS, качество восприятия, QoE, компьютерное зрение, SLAM

Дополненная реальность (Augmented Reality, AR) представляет собой интерактивный опыт, в котором объекты реального мира улучшаются за счет компьютерной генерации перцептивной информации [1]. В отличие от виртуальной реальности, AR накладывает цифровой контент на реальный мир, что создает уникальные вызовы для обеспечения качества обслуживания.

Российские исследования в области дополненной реальности вышли на новый уровень: созданы профильные лаборатории качества восприятия, а также ведутся разработки в сфере машинного обучения для голографических сетей и тактильного интернета [2].

Компьютерное зрение играет важную роль в системах дополненной реальности, решая конкретные практические задачи по отслеживанию положения камеры, распознаванию объектов и построения пространства [3]. Применение методов компьютерного зрения для оценки качества обслуживания в системах дополненной реальности открывает новые возможности для объективного мониторинга производительности.

Приложения дополненной реальности предъявляют высокие требования к параметрам сети. Согласно общепринятым стандартам, таковыми являются:

- задержка;
- пропускная способность;
- точность позиционирования;
- потеря пакетов.

Для приложений реального времени рекомендуемая задержка составлять менее 10–15 мс., а для некритичных сценариев – максимум 100 мс [4].

Качество восприятия (Quality of Experience, QoE) представляет собой субъективную оценку качества пользователем. В исследованиях показано, что применение электроэнцефалографии (ЭЭГ) позволяет предсказывать QoE с высокой точностью [4].

ТАБЛИЦА 1. Основные метрики оценки качества AR

Категория	Метрика	Единица	Оптимальное	Критическое
Сеть	Задержка	мс	< 20	> 100
	Пропускная способность	Мбит/с.	> 50	< 10
	Потеря пакетов	%	< 0.1	> 2
Компьютерное зрение	Точность позиционирования	мм	< 1	> 10
	Частота кадров	FPS	60-90	< 30
	Точность отслеживания	%	> 95	< 80
Качество	PSNR	дБ	> 30	< 20
	SSIM	[0-1]	> 0.9	< 0.7
QoE	MOS	[1-5]	> 4.0	< 2.5

SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) обеспечивает определение положения устройства и построение карты среды [6]. Для AR алгоритмы SLAM должны работать в реальном времени [7].

Точная оценка позы камеры критична для регистрации виртуальных объектов. Основные метрики включают [8]:

- Mean Per Joint Position Error (MPJPE);
- Percentage of Correct Keypoints (PCK).

Определение и сопоставление признаков составляют основу задач по оптимизации качества обслуживания дополненной реальности [9]. Современные методы объединяют традиционные подходы с глубоким обучением [10].

Особенностью дополненной реальности, является наложение виртуального контента на реальный мир создает эффект визуальной путаницы. Исследования показывают необходимость учета взаимного влияния двух слоев при оценке качества [11].

Математически суперпозиция описывается как:

$$I_S = \lambda * I_{AD} + (1 - \lambda) * I_B$$

где λ – коэффициент смешивания, I_{AD} – изображение дополненной реальности, I_B – фоновое изображение [11].

Транспортные параметры QoS, такие как задержка, джиттер и потерянные пакеты, предоставляют измерения производительности для оценки возможностей сети [4]. Для определения уровня поддерживаемой интерактивности необходимо определение более сложных параметров QoS, оценивающих возможности сети с точки зрения комплексного показателя интерактивности.

Базовая концепция интерактивности основана на том, что задержка и количество потерянных пакетов определяют воспринимаемую интерактивность пользователем [4].

Зависимость воспринимаемой интерактивности от задержки описывается, как:

$$f_P(t, i) = f_{max} * \frac{1}{1 + e^{b(t-a)'}}$$

где t – задержка пакета в миллисекундах;

i – индикатор пакета;

a – сдвиг по оси t (мс);

b – градиент функции;

f_{max} – верхняя граница комплексного показателя.

Дополнительно учитываются вариация задержки (PDV) и доля потерянных пакетов через деградирующие множители [5]:

$$IntAc = I_L * D_{PDV} * D_{DQ}$$

где $D_{DQ} = 1 - v * P_{DQ}$, а P_{DQ} – доля потерянных пакетов.

На основе проанализированных исследований предлагается концептуальная модель оценки QoS AR с использованием компьютерного зрения. На схеме представлена четырехэтапная модель интегрированной оценки качества (QoS/QoE) AR-системы. Архитектура связывает первичные данные

датчиков и сети с алгоритмами компьютерного зрения, что позволяет вычислять стабильность трекинга и задержки, формируя на выходе рекомендации для оптимизации работы приложения (рисунок 1).

Данная архитектура помогает решить 3 ключевые задачи:

1. Конвергенция данных – объединение сетевых параметров (метрики сети) и пространственных данных.
2. Объективизация качества – перевод работы сложных алгоритмов (SLAM, оценка позы) в измеримые метрики.
3. Замкнутый контур: переход от пассивного мониторинга к активной оптимизации системы на Уровне 4.

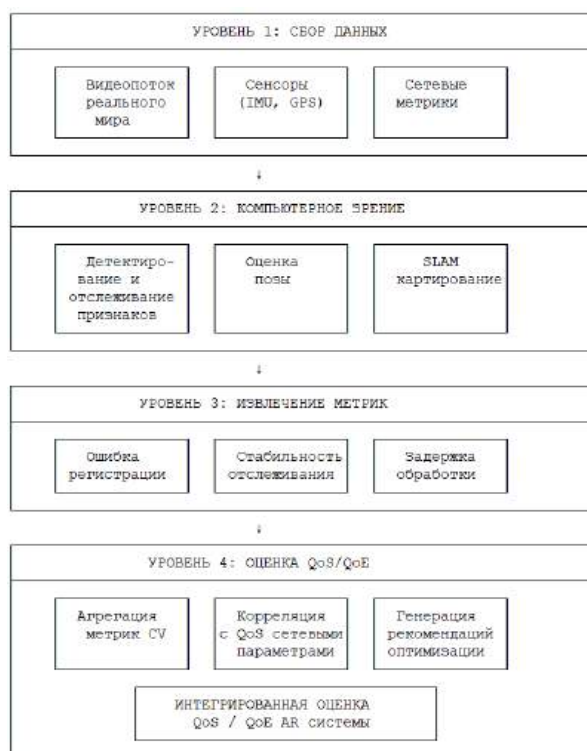


Рис. 1. Архитектура системы оценки QoS AR на основе компьютерного зрения

В статье представлен комплексный обзор теоретических основ оценки QoS дополненной реальности с использованием методов компьютерного зрения. Показано, что традиционные подходы к оценке качества обслуживания недостаточны для приложений дополненной реальности из-за их уникальной природы, сочетающей реальный и виртуальный миры.

Основные выводы исследования:

1. Комплексность оценки. Эффективная оценка QoS AR требует интеграции разнородных метрик: технических параметров компьютерного зрения, сетевых характеристик, качества визуального контента и перцептивных оценок.

2. Роль компьютерного зрения. Методы компьютерного зрения предоставляют объективные инструменты для оценки критически важных аспектов дополненной реальности: точности регистрации, стабильности отслеживания, качества наложения виртуальных объектов.

3. Визуальная путаница. При оценке качества AR необходимо учитывать эффект визуальной путаницы между реальным и виртуальным слоями, что подтверждается исследованиями ARIQA.

4. Психофизиологические методы. Применение ЭЭГ и других физиологических измерений открывает возможности для объективной оценки субъективного качества восприятия (QoE) [5].

5. Адаптивность. Системы оценки QoS должны обеспечивать основу для адаптивной оптимизации параметров приложений дополненной реальности в реальном времени.

Перспективы развития направления связаны с применением глубокого обучения, мультимодальной оценкой, распределенными вычислениями и разработкой стандартов. Дальнейшие исследования должны быть направлены на создание универсальных, но адаптируемых фреймворков оценки QoS, способных учитывать специфику различных сценариев использования дополненной реальности.

Практическая значимость работы заключается в предоставлении исследователям и разработчикам систем дополненной реальности систематизированного обзора методов и метрик оценки качества, что будет способствовать созданию более производительных и качественных приложений дополненной реальности.

Список используемых источников

1. Azuma R. T. A survey of augmented reality // Presence: Teleoperators and Virtual Environments. 1997. Vol. 6. N 4. P. 355–385.
2. Демидов Н. А., Маколкина М. А. Голографическая коммуникация: исследование качества восприятия голографических копий. Труды учебных заведений связи. 2024;10(5):7-13. <https://doi.org/10.31854/1813-324X-2024-10-5-7-13>. EDN: RCSNZL
3. Marchand E., Uchiyama H., Spindler F. Pose estimation for augmented reality: a hands-on survey // IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics. 2016. Vol. 22. N 12. PP. 2633–2651.
4. ETSI TR 103 702 V1.2.1. Augmented Reality (AR); Performance criteria. 2024.
5. Bauman B., Seeling P. Visual Interface Evaluation for Wearables Datasets: Predicting the Subjective Augmented Vision Image QoE and QoS // Future Internet. 2017. Vol. 9, № 3. Art. 40. DOI: 10.3390/fi9030040. URL: <https://www.mdpi.com/1999-5903/9/3/40>
6. Taketomi T., Uchiyama H., Ikeda S. Visual SLAM algorithms: a survey from 2010 to 2016 // IPSJ Transactions on Computer Vision and Applications. 2017. Vol. 9. N 1.

7. Mur-Artal R., Tardós J.D. ORB-SLAM2: an open-source SLAM system // IEEE Transactions on Robotics. 2017. Vol. 33. N 5. P. 1255–1262.
8. Martinez M., Hossain M., Chakareski J. 6D pose estimation for augmented reality // IEEE CVPR Workshops. 2018. P. 1523–1531.
9. Lowe D. G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints // International Journal of Computer Vision. 2004. Vol. 60. N 2. P. 91–110.
- Rublee E., Rabaud V., Konolige K., Bradski G. ORB: an efficient alternative to SIFT or SURF // IEEE ICCV. 2011. P. 2564–2571.
10. Duan H., Guo L., Sun W., Min X., Chen L., Zhai G. Augmented Reality Image Quality Assessment Based on Visual Confusion Theory // IEEE BMSB. 2022. DOI: 10.1109/BMSB55706.2022.9828671.

AN ALGORITHM FOR EVALUATING THE QUALITY OF AUGMENTED REALITY SERVICES USING COMPUTER VISION METHODS

Makolkina M., Trukhin V.

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

Augmented reality technologies are developing rapidly, but their success depends entirely on the imperceptible fusion of the digital and physical worlds. For AR to work flawlessly, just fast Internet is not enough – the system must instantly and accurately understand a person's position in space. Combining network parameters with computer vision methods allows you to create an algorithm for end-to-end service quality assessment. By analyzing tracking stability, frame processing delays, and object positioning errors in real time, this approach helps to find hidden failures in time and automatically optimize the system for a smooth and comfortable dive.

Key words: augmented reality, quality of service, QoS, quality of perception, QoE, computer vision, SLAM

УДК 621.396.4
ГРНТИ 50.37.03

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ МНОГОФАКТОРНОЙ АУТЕНТИФИКАЦИИ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫХ СЕТЕЙ НА ОСНОВЕ АДАПТИВНОЙ НЕЙРОСЕТЕВОЙ ФИЛЬТРАЦИИ С ОБУЧЕНИЕМ

П. В. Мангиров, И. Б. Паращук, А. В. Селезнев

Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного

Рассмотрены теоретические аспекты и практическая возможность оценивания эффективности функционирования системы многофакторной аутентификации пользователей инфокоммуникационных сетей на основе полиморфной, самонастраивающейся (адаптивной) фильтрации стохастических процессов, математически описывающих механизмы преобразования величин переменных состояния подобных систем – значений показателей эффективности их функционирования. Предложенный подход способствует повышению точности и обоснованности результатов оценивания, позволяет «обучить» алгоритмы и иные инструменты фильтрации, подразумевает работу с неопределенными, нечеткими априорными исходными данными о шумах состояния и наблюдения стохастических процессов. Математическим и методологическим фундаментом полиморфных самонастраивающихся (адаптивных) фильтров является нейронная сеть с обучением «с учителем», которая способна приспосабливаться и согласовывать весовые индексы фильтрации с ключевыми характеристиками оцениваемых показателей эффективности функционирования системы многофакторной аутентификации.

многофакторная аутентификация, инфокоммуникационная сеть, пользователь, нейросетевая фильтрация, показатели эффективности, критерий

Принятие решения о качестве и эффективности функционирования системы многофакторной аутентификации (МФА) пользователей современных инфокоммуникационных сетей (ИКС) и управление сложными объектами такого класса обычно организуется на основе наблюдений и оценки их состояния. Качество и эффективность функционирования МФА пользователей зависят от множества аспектов, включая производительность, надежность и защищенность подобных объектов [1-3].

Особая роль в современных непростых условиях обеспечения защиты ИКС от несанкционированного доступа, отводится оценке состояния МФА, эвальвации (с физико-математической точки зрения – фильтрации стохастических процессов смены состояний) параметров, а также показателей качества и эффективности систем такого класса [4, 5].

Фильтрация стохастических процессов смены состояний (значений) параметров, показателей качества и эффективности функционирования МФА,

в нашем случае, рассматривается в рамках традиционных постулатов теории статистических оптимальных систем, причем этот процесс эвальвации подразумевает работу с неопределенными, нечеткими априорными исходными данными о шумах состояния и наблюдения этих оцениваемых стохастических процессов [6].

В реальной ситуации системам МФА приходится функционировать в условиях неконтролируемых искажений и шумов, а также в быстроменяющейся обстановке угроз и рисков безопасности, что предопределяет специфику оценивания на основе фильтрации показателей эффективности процессов в такой стохастической системе с неточно заданными вероятностными характеристиками.

Одним из основных подходов по преодолению априорной неопределенности являются методы и алгоритмы оценивания на основе полиморфной, самонастраивающейся фильтрации стохастических процессов. Устройства, реализующие алгоритмы полиморфной, самонастраивающейся фильтрации стохастических процессов принято называть адаптивными фильтрами, поскольку в процессе функционирования они проявляют свойство «подстраиваться» к априорно неизвестным шумовым и иным условиям функционирования объекта, в нашем случае – к условиям применения системы МФА пользователей современных инфокоммуникационных сетей [7].

Иными словами, фильтр, не использующий знания статистических характеристик (либо восстанавливающий их в процессе анализа измеряемых параметров) и в то же время приспособляющийся к произвольной стационарной шумовой обстановке, будет проявлять свойства адаптивности к неизвестным статистическим характеристикам шумов возбуждения процесса и шумов наблюдения.

Использование подобных полиморфных самонастраивающихся фильтров делает процесс эвальвации (оценивания) адаптивным, но программно-аппаратная имплементация таких «фильтров с адаптацией» технологически сложна, требует значительного объема вычислений и затрат памяти электронных устройств.

При этом, для нашего случая, настройка параметров полиморфного самонастраивающегося фильтра может и должна осуществляться онлайн, адаптивно, по мере доступности новых данных наблюдения о текущих значениях параметров (показателей качества и эффективности) системы МФА [8, 9].

Исходя из этого, могут быть предложены алгоритмы полиморфной, самонастраивающейся (адаптивной) фильтрации, конкретизированные на случай оценивания параметров (показателей качества и эффективности) системы МФА пользователей ИКС и основанные на теории фильтрации Калмана.

Предлагаемые алгоритмы полиморфной, самонастраивающейся (адаптивной) фильтрации, ориентированные на оценивание параметров, показателей качества и эффективности системы МФА пользователей ИКС, имеют ряд ограничений: оптимальную в смысле минимума среднеквадратичной ошибки (МСКО) оценку вектора индикаторов $\hat{\theta}(k+1)$ текущего состояния процесса функционирования системы МФА по всем поступившим к этому моменту времени наблюдениям можно вычислить с помощью соотношений фильтра Калмана с учетом известных матрицы шумов возбуждения процесса $V_{\xi}(k)$ и матрицы шумов наблюдения за процессом $V_{\eta}(k)$ смены состояний параметров (показателей качества и эффективности) системы МФА.

При этом для известных моделей процессов смены состояний параметров (показателей качества и эффективности) сложных систем, данные соотношения будут иметь вид рекуррентных уравнений одношаговой экстраполяции элементов вектора индикаторов $\hat{\theta}(k+1)$ состояния процесса функционирования системы МФА [9, 10]:

$$\begin{aligned} \hat{\theta}(k+1) = & \tilde{P}^T(k+1, k, u) \hat{\theta}(k) + K(k+1) \times \\ & \times [\vec{Z}(k+1) - H(\vec{Y}(k+1)) \tilde{P}^T(k+1, k, u) \hat{\theta}(k+1, k, u)], \end{aligned} \quad (1)$$

где

$$\begin{aligned} K(k+1) = & P(\Delta\vec{\theta}(k+1/k))H^T(\vec{Y}(k+1)) \times \\ & \times [H(\vec{Y}(k+1))P(\Delta\vec{\theta}(k+1/k))H^T(\vec{Y}(k+1)) + V_{\eta}(k+1)]^{-1} \end{aligned} \quad (2)$$

– индекс усиления фильтра Калмана;

$$\begin{aligned} P(\Delta\vec{\theta}(k+1/k)) = & \tilde{P}(k+1, k, u) P(\Delta\vec{\theta}(k)) \times \\ & \times \tilde{P}^T(k+1, k, u) + \Gamma(k) V_{\xi}(k) \Gamma^T(k) \end{aligned} \quad (3)$$

– матрица априорных дисперсий ошибок оценивания состояния процесса;

$$P(\Delta\vec{\theta}(k+1)) = [E - K(k+1)H(k+1)] P(\Delta\vec{\theta}(k+1/k)) \quad (4)$$

– матрица апостериорных дисперсий ошибок оценивания состояния процесса функционирования системы МФА, где переменные в выражениях (1)–(4) имеют известный и описанный в работе [10] физический смысл.

Если элементы матрицы шумов возбуждения процесса $V_{\xi}(k)$ и элементы матрицы шумов наблюдения за процессом $V_{\eta}(k)$ смены состояний параметров (показателей качества и эффективности) системы МФА пользователей ИКС (в выражениях (2) и (3) соответственно) частично или полностью

неизвестны, возникает необходимость синтезировать адаптивные алгоритмы фильтрации.

При этом, несмотря на существование различных полиморфных самонастраивающихся алгоритмов фильтрации, в настоящее время широкое распространение получают методы, основанные на искусственных нейронных сетях. Такие полиморфные самонастраивающиеся нейросетевые алгоритмы фильтрации позволяют адаптироваться к статистическим характеристикам измеряемых параметров, позволяют, в случае необходимости, учитывать нелинейность изменения этих параметров в различных условиях функционирования объекта, в нашем случае – в разнообразных, сложных и непредсказуемых условиях применения системы МФА пользователей современных инфокоммуникационных сетей [10].

Иногда для построения самонастраивающихся фильтров используют, так называемый, полиморфный подход, комбинирующий базовые достоинства правил фильтрации Калмана и преимущества рекуррентных нейронных сетей. Функциональное объединение этих подходов предопределяет хорошую адаптивность фильтрации, поскольку этот гибридный метод использует уникальные способности рекуррентных нейронных сетей аппроксимировать нелинейные функции нескольких переменных. Полиморфный подход, сочетающий достоинства фильтрации Калмана и преимущества нейронных сетей, позволяет синтезировать оптимальные, в смысле критерия МСКО, рекурсивные фильтры, обладающие безусловным достоинством – способностью к обучению с «учителем».

В рамках процедуры обучения полиморфных самонастраивающихся фильтров «с учителем» они находятся в процессе реальной работы и на каждом шаге функционирования происходит подстройка их весовых коэффициентов, индексов усиления фильтра Калмана, с целью повышения точности (минимизации среднеквадратичной ошибки) оценивания. При этом обычно рассматриваются две базовые стадии обучения гибридных адаптивных фильтров: стадия автономного предварительного обучения и стадия обучения интерактивного. Для оцениваемой системы МФА эти стадии выглядят следующим образом. В первом случае, на стадии автономного предварительного обучения, конечное множество значений состояния параметров (показателей качества и эффективности) системы МФА пользователей ИКС предполагается доступным, сформированным «учителем» заранее либо с помощью имитационной модели, либо в результате сбора статистики (по наблюдениям) в процессе функционирования системы МФА при

начальной эксплуатации, в тестовом, пилотном режиме. В качестве критерия оптимизации на стадии автономного обучения используется функционал среднеквадратичной ошибки.

Интерактивная стадия обучения полиморфных самонастраивающихся фильтров «с учителем», ориентированных на оценивание состояния параметров (показателей качества и эффективности) системы МФА пользователей ИКС, предполагает, что фильтр находится в процессе реального функционирования. На этой стадии происходит накопление входных и выходных данных фильтра на каждом шаге функционирования системы МФА, происходит текущая коррекция весовых индексов фильтра с помощью схемы самоподстройки (адаптации), предусматривающей наличие глобальной обратной связи в реальном масштабе времени.

Таким образом, рассмотрены теоретические аспекты и показана практическая возможность оценивания эффективности функционирования системы МФА пользователей ИКС на основе полиморфной, самонастраивающейся (адаптивной) фильтрации стохастических процессов, математически описывающих механизмы преобразования величин переменных состояния подобных систем – значений показателей эффективности их функционирования.

Предложенный подход способствует повышению точности и обоснованности результатов оценивания, позволяет «обучить» алгоритмы и иные инструменты фильтрации, подразумевает работу с неопределенными, нечеткими априорными исходными данными о шумах состояния и наблюдения стохастических процессов. Математическим и методологическим фундаментом полиморфных самонастраивающихся (адаптивных) фильтров является нейронная сеть с обучением «с учителем», которая способна приспосабливаться и согласовывать весовые индексы фильтрации с ключевыми характеристиками оцениваемых показателей эффективности функционирования системы многофакторной аутентификации.

Список используемых источников

1. Костенкова А. В. Многофакторная аутентификация // Региональная информатика и информационная безопасность. Сборник трудов конференций: Санкт-Петербургской международной конференции и Санкт-Петербургской межрегиональной конференции. Вып. 8. СПб.: СПОИСУ. 2020. С. 281–283.
2. Селезнев А. В., Сундуков В. А., Паращук И. Б. Многофакторная аутентификация пользователей информационных систем: особенности и проблемы // Перспективные направления развития отечественных информационных технологий: материалы VII межрегиональной научно-практической конференции. (21-25 сентября 2021 г.) Севастополь: СевГУ, 2021. С. 51–52.

3. Национальный стандарт РФ ГОСТ Р 58833-2020. Защита информации. Идентификация и аутентификация. Общие положения. М.: Стандартиформ. 2020. 32 с.
4. Карманов А. Г., Галимов Т. А. Средства многофакторной аутентификации в современной инфраструктуре безопасности информационных систем // Информация и космос. 2012. № 1, С. 94–97.
5. Авраменко В. С., Батенков К. А., Козленко А. В. Подход к количественной оценке вредоносных воздействий нарушителя безопасности информации в распределенных вычислительных системах // Информационные системы и технологии. 2025. № 4 (150). С. 120–127.
6. Марковская теория оценивания в радиотехнике / Под ред. М.С. Ярлыкова. М.: Радиотехника, 2004. 504 с.
7. Фомин В. Н. Рекуррентное оценивание и адаптивная фильтрация. М.: Наука, 1984. 288 с.
8. Парашук И. Б. Моделирование процесса отклонений показателей качества сети многоканальной радиосвязи от требуемых значений // Радиотехника. 1998. № 11. С.6–9.
9. Сейдж Э., Мэлс Дж. Теория оценивания и ее применение в связи и управлении. М.: Связь, 1976. 496 с.
10. Парашук И. Б., Иванов Ю. Н., Романенко П. Г. Нейросетевые методы в задачах моделирования и анализа эффективности функционирования сетей связи. СПб.: ВАС, 2010. 104 с.

EVALUATION OF THE EFFICIENCY OF A MULTIFACTOR AUTHENTICATION SYSTEM FOR USERS OF INFORMATION AND COMMUNICATION NETWORKS BASED ON ADAPTIVE NEURAL NETWORK FILTERING WITH TRAINING

Mangirov P., Parashchuk I., Seleznev A.

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

This article examines the theoretical aspects and practical feasibility of evaluating the performance of a multifactor authentication system for users of information and communication networks based on polymorphic, self-sustaining (adaptive) filtering of stochastic processes that mathematically describe the mechanisms by which the state variables of such systems are transformed—their performance indicators. The proposed approach improves the accuracy and validity of evaluation results, enables the «training» of algorithms and other filtering tools, and allows for the handling of uncertain, fuzzy a priori data on state noise and the observation of stochastic processes. The mathematical and methodological foundation of polymorphic self-sustaining (adaptive) filters is a supervised neural network capable of adapting and aligning filtering weights with the key characteristics of the multifactor authentication system performance indicators being evaluated.

Key words: multifactor authentication, information and communication network, user, adaptive neural network filtering, performance indicators, criterion

УДК 004.932.75'1
ГРНТИ 28.23

АНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ

А. С. Матвеев

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича,

В данной статье рассматриваются перспективные направления исследований в области Интернета вещей как одной из ключевых концепций современной цифровой среды. Показано, что современный этап развития IoT характеризуется переходом от анализа отдельных технических решений к изучению системных последствий распространения подключенных устройств. Рассмотрены основные направления дальнейших исследований, включая интеграцию Интернета вещей с искусственным интеллектом, развитие систем непрерывного мониторинга, применение IoT в медицине. Отдельное внимание уделено проблемам и ограничениям дальнейших исследований. Цель работы заключается в анализе перспективных направлений и ключевых ограничений дальнейших исследований в области Интернета вещей.

интернет вещей, IoT, искусственный интеллект, цифровая среда, устойчивое развитие, междисциплинарные исследования

Введение

Интернет вещей – это концепция, предполагающая объединение физических объектов, устройств и систем в единую сеть, в рамках которой возможен автоматический обмен данными и согласованное взаимодействие без непосредственного участия человека [1]. В такой системе устройство рассматривается не как пассивный элемент инфраструктуры, а как активный участник цифрового взаимодействия. Сенсоры, контроллеры, исполнительные механизмы и иные компоненты получают возможность фиксировать состояние среды, передавать информацию, реагировать на изменения и участвовать в автоматизированных процессах.

Развитие Интернета вещей привело к тому, что данная область стала рассматриваться не только как совокупность технических решений, но и как самостоятельное направление научных исследований. Если ранее основное внимание уделялось подключению устройств, передаче данных и построению сетевой архитектуры, то в настоящее время исследовательский интерес все чаще смещается к более широким вопросам.

Рост научного интереса подтверждается увеличением количества публикаций, посвященных данной теме. По данным электронной библиотеки eLIBRARY [2], общее количество работ на тему «Интернет вещей» в 2010 году составляло 885, тогда как в 2025 году количество таких работ достигло 15971 (рис. 1). Такой прирост отражает устойчивое усиление внимания к проблематике IoT и указывает на значительный потенциал дальнейшего развития исследований.

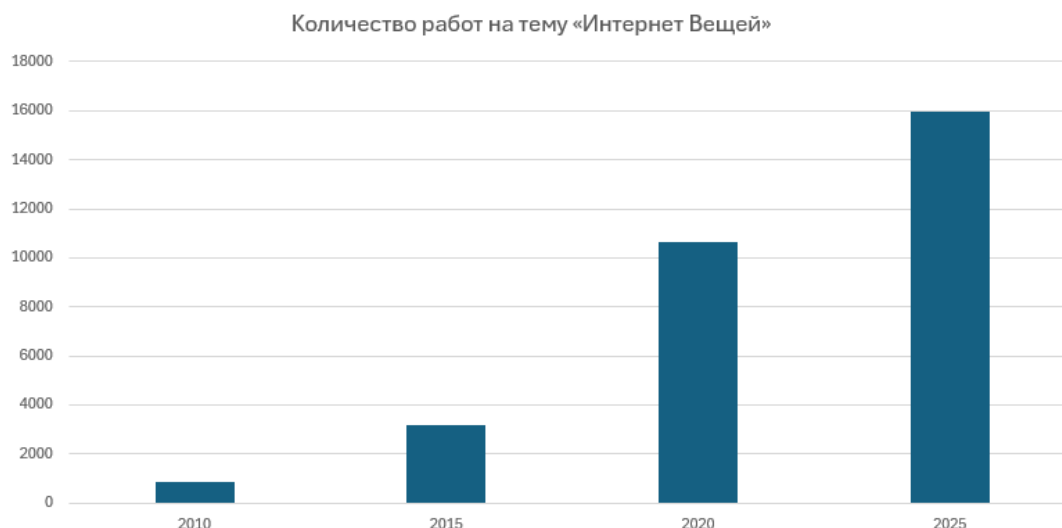


Рис. 1. Количество работ на тему «Интернет вещей»

1. Основные направления развития исследований Интернета вещей

Одним из наиболее значимых направлений является изучение интеграции Интернета вещей с системами искусственного интеллекта. На первых этапах развития IoT подключенные устройства в основном только собирали и передавали какие-то данные. Но теперь, в настоящее время, все большую роль будут играть системы, которые смогут сами анализировать информацию, находить связи между данными и использовать результаты анализа при принятии решений. Именно поэтому исследователи изучают уже не только отдельные датчики и устройства, но и целые умные системы, в которых сбор данных, их обработка и автоматическое управление связаны между собой.

Еще одно важное направление связано с постоянным наблюдением за объектами, окружающей средой и состоянием человека. Интернет вещей позволяет быстро замечать какие-либо изменения и реагировать на них. Однако постоянный сбор информации может восприниматься как лишний контроль. Поэтому при разработке таких систем важно учитывать не только их

пользу, но и право человека на личную жизнь, самостоятельность и безопасность данных.

Большое значение имеет применение Интернета вещей в медицине. Подключенные устройства могут измерять показатели здоровья, передавать данные врачам и сообщать об каких-либо отклонениях. Это помогает раньше выявлять возможные проблемы, наблюдать за пациентами на расстоянии и подбирать лечение с учетом их состояния. При этом остаются вопросы о точности измерений и защите медицинских данных.

Также очень важно влияние Интернета вещей на общество. Подключенные устройства меняют повседневную жизнь, условия труда и привычные способы выполнения различных действий. Люди все чаще передают часть задач автоматическим системам. В связи с этим важно понять, насколько пользователи готовы доверять таким технологиям и не приведет ли их распространение к усилению цифрового неравенства.

Таким образом, будущие исследования Интернета вещей будут посвящены не только новым устройствам и технологиям, а будут посвящены самому предмету изучения. Если ранее ключевой задачей было объяснить, как соединить устройства в сеть и обеспечить обмен данными, то теперь на первый план выходят вопросы интеллектуальной интеграции, человеческого контроля, доверия, устойчивости, пространственной организации и социальной приемлемости IoT-среды [3].

2. Проблемы и ограничения исследований Интернета вещей

Рассмотрим основные проблемы и ограничения, которые необходимо учитывать при анализе дальнейшего развития исследований в области Интернета вещей.

Одной из главных проблем остается неустойчивость понятийных границ Интернета вещей. Несмотря на многолетнее развитие данной области, понятие IoT по-прежнему используется в разных значениях. В одних исследованиях оно обозначает совокупность подключенных устройств и сенсорных систем, в других – более широкую цифровую инфраструктуру, включающую искусственный интеллект, облачные вычисления, большие данные и платформенные решения. В результате часть работ выходит за рамки классического понимания IoT и приближается к исследованию цифровой трансформации в целом.

Существенным ограничением является высокая зависимость IoT от смежных технологических направлений. Современный Интернет вещей раз-

вивается в тесной связи с искусственным интеллектом, большими данными, облачными вычислениями, робототехникой и цифровыми платформами. С одной стороны, это усиливает исследовательский потенциал области, с другой – создает риск размывания специфики IoT как самостоятельного объекта анализа [3].

Законность применения систем IoT по-прежнему остается препятствием его развития. Пока не всегда понятно, кто должен отвечать за решения, принятые автоматической системой. Также нет единых правил о том, какие данные можно собирать, как их хранить и как защищать личную информацию. Важно, чтобы пользователю было понятно, как работает система и для чего она использует его данные [4]. Особенно серьезными эти вопросы становятся при работе с биометрическими данными, наблюдении за людьми и управлении важными объектами.

Само понятие IoT имеет широкие и не всегда четкие границы. Оно связано с искусственным интеллектом, сетями связи, облачными сервисами и другими технологиями. При этом одни направления изучены лучше, чем другие, а сами технологии быстро меняются. Поэтому исследователям нужны понятные термины, общие критерии и единые методы изучения IoT.

Выводы

Проведенный анализ показывает, что Интернет вещей уже не является только сетью подключенных устройств. Современные IoT-системы включают датчики, контроллеры, устройства управления, программы для обработки данных, искусственный интеллект и цифровые платформы. Все эти элементы работают вместе и выполняют общую задачу.

Исследования IoT помогают понять, как подключенные устройства меняют разные сферы жизни. Системы IoT уже применяются в экономике, медицине, науке, городском хозяйстве и быту. Поэтому необходимо изучать не только технические возможности Интернета вещей, но и его влияние на людей и общество. Также важно учитывать вопросы безопасности, права, этики и воздействия таких систем на окружающую среду.

Список используемых источников

1. Утегенов Н. Б. Интернет вещей (IoT) и информационные системы // Universum: технические науки. 2023. № 7-1 (112). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/internet-veschey-iot-i-informatsionnye-sistemy> (дата обращения: 10.05.2026).
2. eLIBRARY.RU: научная электронная библиотека. Результаты поиска по запросу «Интернет вещей». URL: <https://elibrary.ru/> (дата обращения: 10.05.2026).

3. Sevak K. Y., George B. The evolution of Internet of Things (IoT) research in business management: a systematic review of the literature // Journal of Internet and Digital Economics. 2024. Vol. 4. N 3. PP. 242–265. DOI: 10.1108/JIDE-12-2023-0026. URL: <https://ideas.repec.org/a/eme/jidepp/jide-12-2023-0026.html> (дата обращения: 10.05.2026).

4. Шаюсупова Л. Р., Мукимов Х. А. Интернет вещей: история возникновения, развития и угрозы // JMBM. 2022. № 4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/internet-veschey-istoriya-vozniknoveniya-razvitiya-i-ugrozy> (дата обращения: 10.05.2026).

Статья представлена научным руководителем, доктором технических наук, профессором кафедры СС и ПД СПбГУТ, профессором А. И. Парамоновым.

ANALYSIS OF PROSPECTIVE RESEARCH DIRECTIONS IN THE FIELD OF THE INTERNET OF THINGS

Matveev A.

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

This paper examines prospective research directions in the field of the Internet of Things as one of the key concepts of the modern digital environment. It is shown that the current stage of IoT development is characterized by a shift from the analysis of individual technical solutions to the study of the systemic consequences of the spread of connected devices. The main directions for further research are considered, including the integration of the Internet of Things with artificial intelligence, the development of continuous monitoring systems, and the application of IoT in medicine. Particular attention is paid to the problems and limitations of further research. The purpose of the study is to analyze prospective directions and key limitations of further research in the field of the Internet of Things.

Key words: Internet of Things, IoT, artificial intelligence, digital environment, sustainable development, interdisciplinary research

УДК 004.8:519.17

ГРНТИ 28.23

ОСНОВЫ АВТОМАТИЗАЦИИ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА НА ОСНОВЕ ГРАФОВЫХ МОДЕЛЕЙ

А. С. Матвеев

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В данной статье рассматриваются основы автоматизации рабочих процессов с применением искусственного интеллекта на базе графовых моделей, при которых многошаговые процедуры описываются ориентированным графом операций и зависимостей. Показано, что включение интеллектуальных компонентов в узлы графа обеспечивает интерпретацию данных, формирование решений и адаптацию последующих действий, расширяя возможности автоматизации по сравнению с традиционными сценариями. Проанализированы ключевые технологические компоненты, которые могут быть применены в графовой автоматизации рабочих процессов, рассмотрен ориентированный ациклический граф как удобная форма спецификации зависимостей, обеспечивающая явное задание порядка выполнения процессов, параллельное исполнение независимых этапов и поддержку анализа промежуточных результатов. В качестве прикладной иллюстрации приведен пример платформы п8п, демонстрирующей визуальное построение процессов в виде графа узлов и средства «оркестрации» интеллектуальных компонентов. Рассмотрен пример рабочего процесса в среде п8п, реализующего взаимодействие пользователя с базой данных посредством искусственного интеллекта. Цель работы заключается в обзоре основ автоматизации рабочих процессов на базе графовых моделей с акцентом на включение компонентов искусственного интеллекта в структуру ориентированного графа, при котором отдельные узлы реализуют интеллектуальные функции интерпретации данных, формирования решений и адаптации последующих этапов на основании полученных результатов.

автоматизация рабочих процессов, искусственный интеллект, графовые модели

Введение

Автоматизация рабочих процессов заключается в передаче выполнения задач и управляющей логики программным средствам, способным реализовать процесс целиком, либо на уровне отдельных стадий [1]. Автоматизация рабочих процессов с применением искусственного интеллекта на основе графовых моделей представляет собой подход, при котором многошаговые процедуры формализуются в виде ориентированного графа, где узлы соответствуют операциям обработки данных, а связи задают зави-

симости выполнения и маршруты передачи результатов между этапами [2]. Включение компонентов искусственного интеллекта в структуру ориентированного графа приводит к тому, что отдельные узлы графа могут реализовывать интеллектуальные функции, связанные с интерпретацией входных данных, формированием решений и адаптацией дальнейших действий на основании полученных результатов [2].

1. Аналитический обзор и постановка задачи

Рассмотрим технологии искусственного интеллекта и сопутствующие технологические компоненты, которые могут быть включены в структуру ориентированного графа.

Программные интерфейсы приложений (API) выступают механизмом взаимодействия программных систем и обеспечивают обмен данными и вызов функций между сервисами [3]. Включение в структуру ориентированного графа таких интерфейсов позволяет связать источники данных, прикладные системы и вычислительные модули в единую цепочку исполнения, обеспечивая сквозную передачу результатов между этапами.

Генеративные методы искусственного интеллекта (GenAI) предназначены для получения нового контента по запросу, включая текст, изображения, видео, аудио и программный код [3]. Включение в структуру ориентированного графа генеративных методов позволяет использовать их как самостоятельный этап формирования результата, так и как вспомогательный модуль, поддерживающий подготовку материалов и выработку вариантов решений в рамках процесса.

Машинное обучение (ML) представляет собой класс методов, формирующих модели на основе данных и повышающих точность результатов по мере накопления опыта [3]. Включение в структуру ориентированного графа методов машинного обучения позволяет реализовать как этап построения модели, так и этап ее применения для получения предсказаний, которые далее используются другими узлами процесса при выполнении операций контроля, классификации или прогнозирования.

Обработка естественного языка (NLP) включает методы анализа и порождения текстов, позволяющие преобразовывать неструктурированные документы в структурированные представления [3]. Включение в структуру ориентированного графа методов обработки естественного языка обеспечивает извлечение фактов из отчетов и иных текстовых источников, а также

последующую поддержку принятия решений на основе полученной информации.

Оптическое распознавание символов (OCR) обеспечивает преобразование изображений текста в машиночитаемый формат и относится к методам автоматизированного извлечения данных [3]. Включение в структуру ориентированного графа данного компонента используется при оцифровке документов и интеграции полученной информации в современные системы хранения и управления знаниями, что обеспечивает вовлечение данных с традиционных носителей в графовые процессы обработки и анализа.

В свою очередь, для значительной части задач автоматизации удобной формой графового представления выступает ориентированный ациклический граф (DAG), позволяющий явно фиксировать порядок выполнения этапов, точки разветвления и объединения результатов, а также обеспечивать параллельное исполнение независимых вычислительных шагов [4]. Кроме того, структура ориентированного ациклического графа облегчает анализ процесса, включая идентификацию критических путей, определяющих минимально возможную длительность выполнения, и выявление узлов, чувствительных к качеству входных данных. В контексте искусственного интеллекта это приобретает особую значимость, поскольку интеллектуальные узлы нередко формируют вероятностные результаты, а последующие этапы могут требовать проверки, нормализации или согласования выводов, что делает явное описание порядка и зависимостей ключевым условием управляемости всего процесса [4].

На рисунке 1 представлен пример ориентированного ациклического графа, в котором каждый узел соответствует отдельной операции, а стрелки задают зависимости между этими операциями и допустимый порядок выполнения. «А» является исходной операцией, после выполнения которой становятся доступны два параллельных узла «В» и «С». «В» и «С» выполняются независимо друг от друга, но оба узла сходятся «D». Это означает, что «D» зависит одновременно от «В» и «С» и может быть запущен только после завершения обеих операций. После завершения «D» выполняется финальная операция «F». Стрелки фиксируют направленность связей и тем самым задают правило, что результаты передаются только вперед по графу.

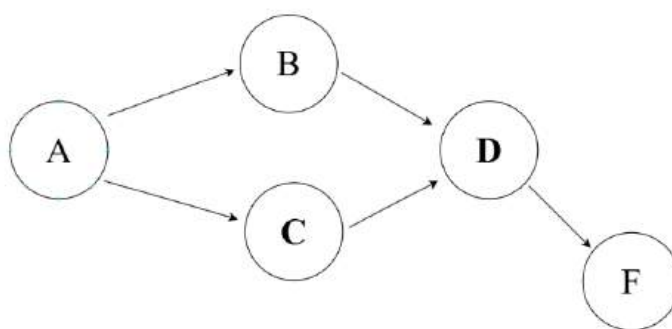


Рис. 1. Ориентированный ациклический граф

Однако в современных постановках задач автоматизации графовое представление процессов нередко включает условные ветвления, циклы и компоненты с участием человека в контуре управления, что требует переосмысления проектирования и исполнения процессов за пределами традиционных и ограниченных структур ориентированных ациклических графов [2].

В связи с этим ориентированный ациклический граф целесообразно рассматривать как базовую и удобную форму спецификации зависимостей для широкого класса процессов, но при моделировании процессов с выраженной адаптивностью и интерактивностью, характерных для применения искусственного интеллекта, требуется расширение модели управления выполнением и ее интерпретации как более общей системы исполнения, включающей правила переходов, проверки качества и механизмы возврата к предшествующим этапам [2, 4].

2. Подходы к решению задачи

В качестве реального примера применения графовой модели автоматизации рабочих процессов может быть рассмотрена платформа n8n. Платформа n8n представляет собой средство автоматизации рабочих процессов, в котором процессы визуально конструируются в виде направленного графа взаимосвязанных узлов и соединений. Согласно описанию системы, базовой моделью представления и исполнения процесса выступает ориентированный ациклический граф, где узлы соответствуют отдельным операциям, а соединения фиксируют зависимости и порядок их выполнения [5]. Узлы реализуют дискретные операции, включая вызовы внешних сервисов, преобразование данных, выполнение сценариев и обращение к компонентам

искусственного интеллекта, тогда как соединения определяют последовательность и логику выполнения этапов [5].

Для интеграции искусственного интеллекта в п8п описывается набор средств, позволяющих «оркестрировать» различные интеллектуальные компоненты [5]. К ним относятся узлы прямого взаимодействия с внешними сервисами моделей, поддержка построения цепочек вызовов для многошагового рассуждения, возможность подключения векторных хранилищ для сценариев генерации с извлечением, а также организация контуров обратной связи, в которых собираются отклики пользователей и иницируются процедуры дообучения моделей на внешних вычислительных платформах [5]. Таким образом, графовая модель процесса используется не только для описания последовательности операций, но и для формализации взаимодействия между этапами извлечения данных, интеллектуальной интерпретации и последующей валидации и фиксации результата.

На рисунке 2 представлен пример рабочего процесса в среде п8п, реализующего взаимодействие пользователя с базой данных посредством искусственного интеллекта. Он выполнен в виде направленного графа, в котором каждый узел соответствует отдельной операции, а соединения задают зависимости между операциями и допустимый порядок выполнения. Исходным узлом выступает «When chat message received», который иницирует выполнение процесса при поступлении сообщения в чат и передает текст запроса в последующий узел «AI Agent». Узел «AI Agent» выполняет интерпретацию запроса и координирует дальнейшие действия, используя подключаемые компоненты, ассоциированные с данным узлом. В качестве компонента языковой модели используется «OpenAI Chat Model», обеспечивающий обработку естественного языка и формирование ответа. Для хранения контекста взаимодействия применяется компонент «Simple Memory», поддерживающий историю промежуточной информации и параметров диалога. Для обращения к данным используется компонент «Postgres», выполняющий запросы к базе данных и возвращающий результаты, которые далее учитываются агентом при генерации ответа. Таким образом, направленные связи фиксируют последовательность обработки от события поступления сообщения к интеллектуальной интерпретации и, при необходимости, к выполнению запроса в базе данных с последующим формированием ответа.

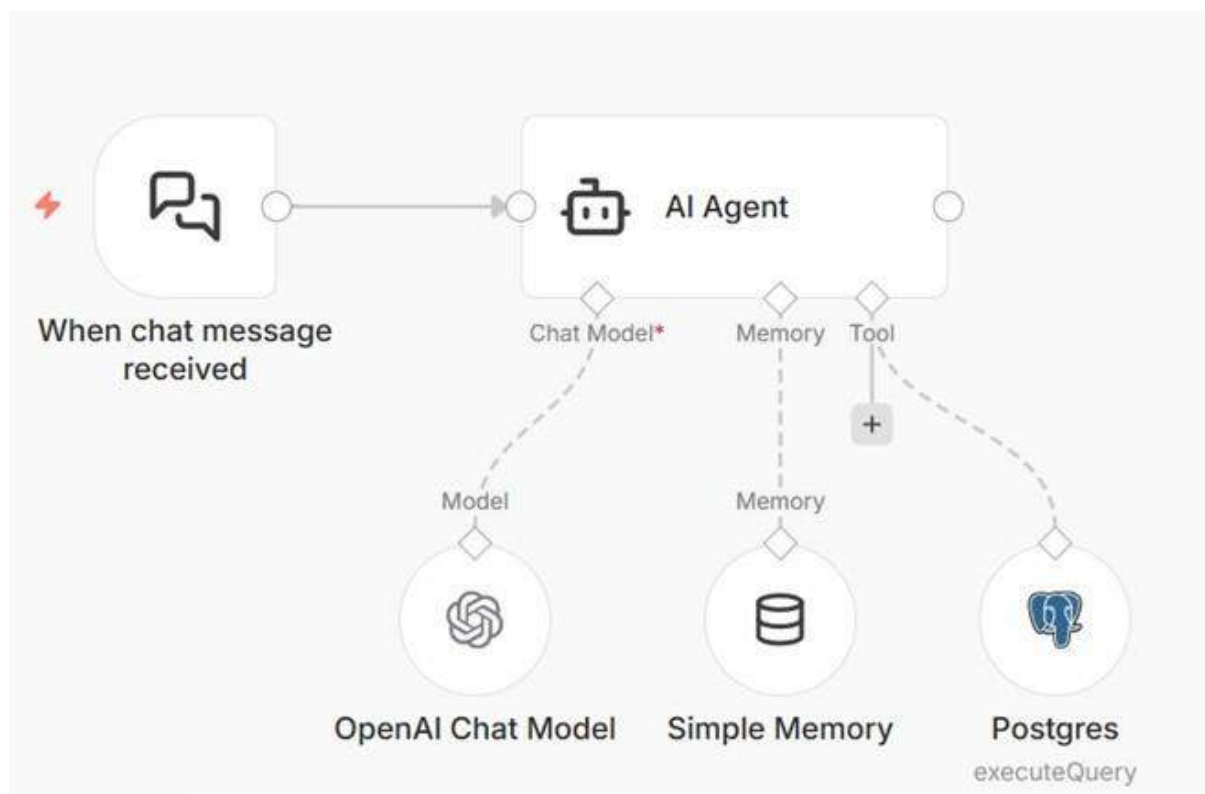


Рис. 2. Пример рабочего процесса в среде n8n

Выводы

Таким образом автоматизация рабочих процессов на основе графовых моделей формирует методологическую основу для построения управляемых многошаговых процедур, в которых структура зависимостей между этапами задается явно и поддается формальному анализу. Интеграция технологий искусственного интеллекта в узлы графа расширяет функциональные возможности процессов за счет обработки неструктурированных данных, извлечения знаний, прогнозирования и генерации контента, однако одновременно повышает требования к контролю качества и интерпретации результатов вследствие вероятностного характера выводов моделей.

В свою очередь, ориентированный ациклический граф целесообразно рассматривать как базовую форму спецификации зависимостей для широкого класса задач, поскольку он обеспечивает прозрачность порядка выполнения и возможность параллельного исполнения независимых этапов.

Вместе с тем современные процессы, ориентированные на адаптивность и взаимодействие с пользователем, нередко требуют условных переходов, повторов и этапов согласования, что приводит к необходимости расширения графовой спецификации до более общей модели исполнения,

включающей правила переходов, механизмы обработки исключений и процедуры верификации результатов.

Список используемых источников

1. What Is Workflow Automation? IBM. 2025. URL: <https://www.ibm.com/think/topics/workflow-automation> (дата обращения: 10.05.2026).
2. Shin W., Souza R., Rosendo D. и др. The (R)evolution of Scientific Workflows in the Agentic AI Era: Towards Autonomous Science / W. Shin, R. Souza, D. Rosendo и др. // Proceedings of the ACM. 2025. PP. 2305–2316. DOI: 10.1145/3731599.3767580. URL: <https://doi.org/10.1145/3731599.3767580>.
3. AI workflow. IBM. 2024. URL: <https://www.ibm.com/think/topics/ai-workflow>
4. Apache Airflow Docs: Dags. Apache Airflow Documentation. 2025. URL: <https://airflow.apache.org/docs/apache-airflow/stable/core-concepts/dags.html> (дата обращения: 10.05.2026).
5. Venkiteela P. n8n: An Open-Source Workflow Automation Platform for Enterprise Integration and AI-Driven Orchestration / P. Venkiteela // International Journal of Computer Applications. 2025. Vol. 187. N 11. DOI: 10.5120/ijca2025926031. URL: <https://doi.org/10.5120/ijca2025926031> (дата обращения: 10.05.2026).

Статья представлена научным руководителем, доктором технических наук, профессором кафедры СС и ПД СПбГУТ, профессором А. И. Парамоновым.

BASICS OF AI-BASED WORKFLOW AUTOMATION BASED ON GRAPH MODEL

Matveev A.

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

This paper examines the basics of AI-based workflow automation based on graph models, in which multi-step procedures are described as a directed graph of operations and dependencies. It is shown that the inclusion of intelligent components in graph nodes enables data interpretation, decision formation, and adaptation of subsequent actions, thereby expanding the possibilities of automation compared to traditional scenarios. The key technological components that can be applied in graph-based workflow automation are analyzed, and the directed acyclic graph is considered as a convenient form for specifying dependencies, providing an explicit definition of process execution order, parallel execution of independent stages, and support for analyzing intermediate results. As an applied illustration, the n8n platform is presented as an example demonstrating the visual construction of processes in the form of a graph of nodes and the means of “orchestrating” intelligent components. An example of a workflow in the n8n environment is considered, implementing user interaction with a database through artificial intelligence. The purpose of the work is to review the fundamentals of workflow automation based on graph models, with an emphasis on the inclusion of artificial intelligence components in the structure of a directed graph, in which individual nodes implement intelligent functions of data interpretation, decision formation, and adaptation of subsequent stages based on the obtained results.

Key words: workflow automation, artificial intelligence, graph models

УДК 621.396.96
ГРНТИ 47.49.31

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ОШИБКИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ОТ КАЧЕСТВА ПРИЕМА СИГНАЛОВ ГНСС В RTKLIB

Д. Е. Мещеряков, А. О. Тишков

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В работе представлены результаты исследования влияния качества приема сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) на точность позиционирования в программном обеспечении RTKLIB. Данные постобработки получаются на основе файла наблюдений и эфемерид с базовой станции и ровера. Производится анализ возможностей RTKLIB: поддержка набора частотных диапазонов и навигационных систем, настройка угловой маски, средства оценки отношения сигнал/шум. Описанное исследование может применяться для оценки точности координат в различных сценариях приема сигналов ГНСС.

RTKLIB, оценка координат, отношение сигнал/шум, позиционирование, RINEX

RTKLIB – программа, используемая для получения оценок координат (ОК) с возможностью настройки параметров системы для различных условий использования навигационного приемника в задачах позиционирования на местности [1-2]. В рамках данной статьи был произведен научный эксперимент в сценарии NLOS (Non Line of Sight) в котором использовались 2 приемника геодезического класса, а именно ровер PrinCe i30 [3] и базовая станция PrinCe i90VR [4], для создания условий экранирования была использована металлическая решетка, обеспечивающая многолучевое распространение спутниковых сигналов, установленная над приемником.

В результате проведенного эксперимента были получены навигационные данные в формате RINEX, а именно два файла с каждого устройства, один с базовой станции и один с ровера. Для получения итоговых оценок координат обратимся к программной библиотеке RTKLIB. Приложение позволило проанализировать полученные ОК при использовании различных конфигурационных настроек. В данном эксперименте преимущественно рассматривались два подхода фильтрации доступные в исследуемом ПО, а именно конфигурация принимаемых частот или выбор порогового значения ОСШ для спутниковых сигналов, и выяснить как эти настройки влияют на качество принимаемых ОК.

Для получения итоговых ОК было необходимо настроить приложение RTKPOST (рис. 1), обратившись к библиотеке RTKLIB. В окне приложения необходимо было выбрать пути к навигационным файлам с геодезических приемников.

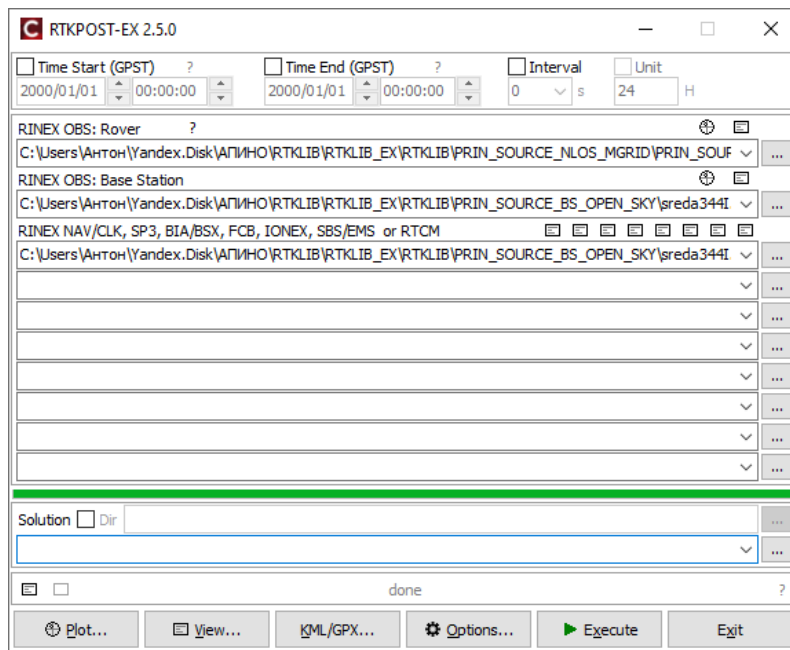


Рис. 1. Окно приложения RTKPOST

Далее во вкладке «Options» мы можем настроить исследуемые параметры (рис. 2).

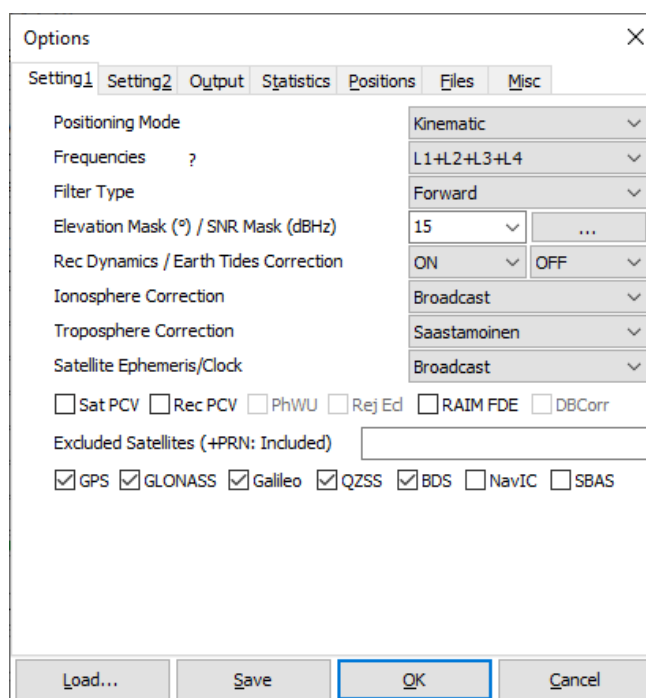


Рис. 2. Окно параметров обработки RTKLIB

Нам интересно поле «Frequencies», в нем мы можем настраивать используемые частоты в конфигурациях: L1+L2+L3+L4, L1+L2+L3, L1+L2, L1. Конфигурация с частотами L1+L2+L3+L4 принята за опорную. Оценки координат, полученные в других частотных конфигурациях, сравниваются с оценками, полученными в опорной конфигурации.

Первая рассматриваемая конфигурация частот L1+L2+L3 (рис. 3). Отличия ОК в данной конфигурации от ОК в исходной конфигурации L1+L2+L3+L4 являются незначительными.

Набор ОК для второй конфигурация частот L1+L2 (рис. 4) также не показал существенных изменений по сравнению с ОК в исходной конфигурации.

При третьей конфигурации с частотой L1 (рис. 5), в отличие от сценария с использованием всех частот L1+L2+L3+L4, разброс оценок координат за весь период измерений оказался меньше, а плотность облака оценок координат – выше. Это означает, что в условиях NLOS использование только частоты L1 позволяет отфильтровать часть сигналов, искаженных многолучевым распространением, и повысить устойчивость позиционирования.

Полученный результат можно объяснить наличием экрана в рамках сценария NLOS, описанного в работе, поскольку экранирование металлической решеткой оказывает большее влияние на спутниковые сигналы, расположенные на более высоких частотах.

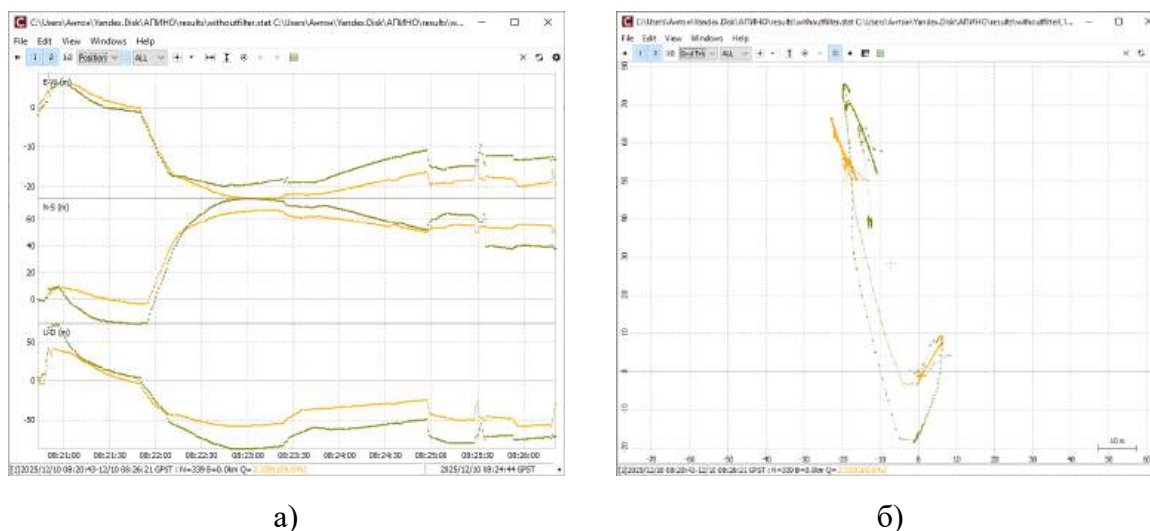
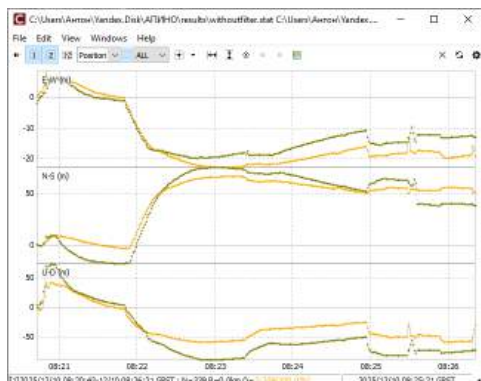
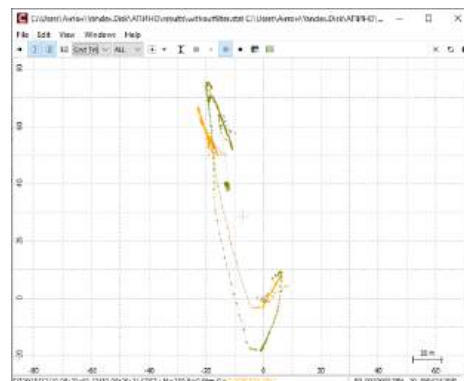


Рис. 3. Сравнение ОК без учета фильтрации (оранжевый цвет) и с учетом фильтрации (зеленый цвет) по конфигурации частот (L1+L2+L3): а) представление по широте, долготе и высоте; б) двумерное представление

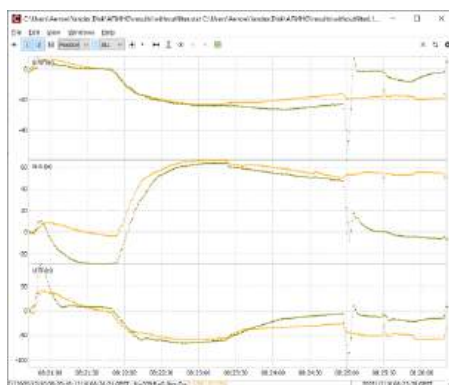


а)

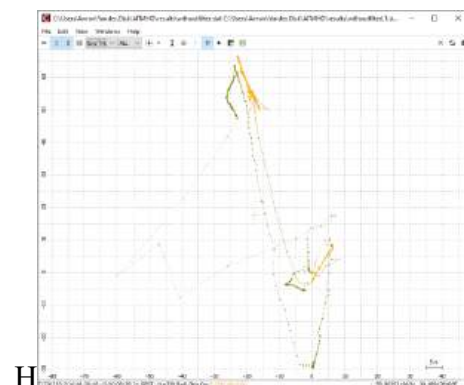


б)

Рис. 4. Сравнение ОК без учета фильтрации (оранжевый цвет) и с фильтрацией по конфигурации частот (L1+L2): а) представление по широте, долготе и высоте; б) двумерное представление



а)



б)

Рис. 5. Сравнение ОК без учета фильтрации (оранжевый цвет) и с фильтрацией по конфигурации частот (L1): а) представление по широте, долготе и высоте; б) двумерное представление

В программе RTKPOST маска по ОСШ задается в виде таблицы значений для углов места от 0° до 90° с шагом 10° (рис. 6). В эксперименте использовались пороги 40 и 45 дБГц, одинаковые для всех углов места и частот.

SNR Mask	
	☒ Rover ☐ Base Station
	Elevation (deg)
	<5 15 25 35 45 55 65 75 >85 (dBHz)
L1	35 35 35 35 35 35 35 35 35
L2/E5b	35 35 35 35 35 35 35 35 35
L5/E5a	35 35 35 35 35 35 35 35 35
L6	35 35 35 35 35 35 35 35 35

OK Cancel

Рис. 6. Конфигурация SNR маски

При маске по ОСШ равной 40 дБГц в приложении RTKLIV показал наиболее плотное облако ОК относительно исходной конфигурации, что свидетельствует о удалении из расчета данных спутников, подверженных искажениям из-за многолучевого распространения (рис. 7).

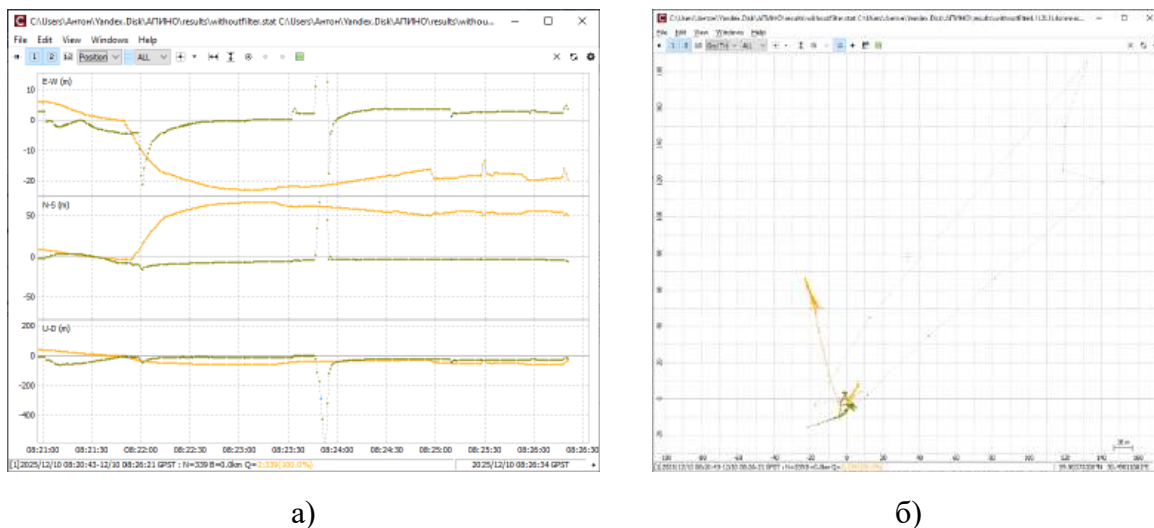


Рис. 7. Сравнение координат с учетом ОСШ 40 дБГц:
а) представление по широте, долготе и высоте; б) двумерное представление

При маске по ОСШ равной 45 дБГц RTKLIV не смог разрешить целочисленные неоднозначности фаз и получил крайне малое количество оценок координат, следовательно нет необходимости увеличивать порог по ОСШ (рис. 8).

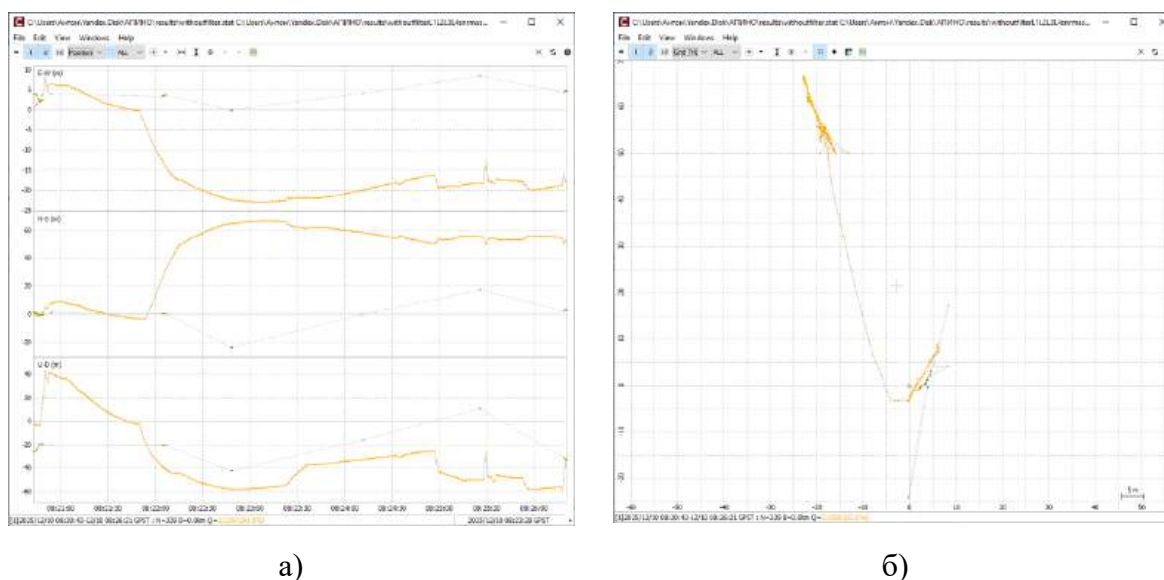


Рис. 8. Графики сравнения координат с учетом ОСШ 45 дБГц:
а) представление по широте, долготе и высоте; б) двумерное представление

В ходе проведенного исследования был произведен сравнительный анализ методов фильтрации навигационных данных, в следствие чего было показано, что фильтрация по ОСШ может иметь высокую эффективность.

Благодаря фильтрации по частоте, установлено, что в подобных сценариях, одночастотные приемники, могут получить меньшее облако ОК. Дальнейшее исследование может быть продолжено в рамках более точной настройки фильтрации по ОСШ, а также разработки алгоритма для определения ее оптимальной конфигурации.

Список используемых источников

1. RTKLIB: An Open-Source Program Package for GNSS Positioning. Tomoji Takasu. URL: <https://github.com/tomojitakasu/RTKLIB> (дата обращения: 8.05.2026).
2. Фокин Г. А., Мешеряков Д. Е. Обзор возможностей программно-аппаратного комплекса PrinCe для высокоточного позиционирования методом RTK // Экономика и качество систем связи. 2025. № 3 (37). С. 77-95.
3. Приемник PrinCe i30. URL: https://prinmarket.ru/catalog/priyemniki/prince_2/i30/priemnik_prince_i30/ (дата обращения: 8.05.2026).
4. Приемник PrinCe i90VR. URL: https://www.prin.ru/gnss/prince/priemnik_prince_i90_vr/ (дата обращения: 8.05.2026).

Статья представлена научным руководителем, заведующим кафедрой БТС СПбГУТ, доктором технических наук, доцентом Г. А. Фокиным.

RESEARCH THE DEPENDENCE OF POSITIONING ERROR ON GNSS SIGNAL RECEPTION QUALITY IN RTKLIB

Meshcheriakov D., Tishkov A.

The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications

This paper presents the results of a study examining the impact of global navigation satellite system (GNSS) signal reception quality on positioning accuracy using RTKLIB software. Postprocessing data is performed using a base station observation file and an ephemeris file. RTKLIB capabilities are analyzed, including support for a range of frequency bands and navigation systems, angular mask settings, and signal-to-noise ratio estimation tools. This study can be applied to coordinate accuracy analysis in various signal reception scenarios.

Key words: RTKLIB, coordinate estimation, signal-to-noise ratio, positioning, RINEX

УДК 004.855.5

ГРНТИ 50.51.15

МЕТОД ДОСТРАИВАНИЯ ВИДЕОИНФОРМАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ U-NET И ИНТЕРПОЛЯЦИИ ОПТИЧЕСКОГО ПОТОКА

Е. А. Морозова, С. Л. Фёдоров

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Рассматривается задача синтеза частей изображения за пределами исходных границ кадра. Предложена двухэтапная схема: предобученная модель U-Net достраивает ключевые кадры по бинарной маске; алгоритм Фарнебека вычисляет плотный оптический поток, по которому формируются промежуточные кадры. Метод оценен по метрикам PSNR и SSIM и сравнен с базовыми подходами

достраивание видео, оптический поток, U-Net, интерполяция кадров

Задача генерации дополнительных частей изображения за пределами исходных границ видеокadra актуальна при изменении соотношения сторон, коррекции угла съемки и реставрации видеоархивов [1, 2]. В отличие от классического метода, где заполняемая область окружена известным контентом со всех сторон, рассматриваемый предполагает синтез областей, ограниченных контекстом лишь с одной-двух сторон, что принципиально усложняет задачу [3]. Дополнительной сложностью для видеоданных является обеспечение временной согласованности: независимая обработка каждого кадра порождает мерцание и структурные разрывы между кадрами [4].

Реализованные подходы к решению проблемы, представленной выше на базе 3D-сверток [2] и потоковых сетей [4] обеспечивают относительно высокое качество результата, но, естественно, предъявляют высокие требования к вычислительным ресурсам и наличию GPU, по этой причине применение таких методов на потребительском оборудовании оказывается затруднительным.

Предлагаемый в данной статье подход построен по двухэтапной схеме, что помогает обеспечить приемлемую для потребительского оборудования вычислительную сложность. Предобученная сеть U-Net [4] обрабатывает только ключевые кадры, а промежуточные кадры восстанавливаются с помощью метода оптического потока Фарнебека [3] без дополнительных об-

ращений к нейронной сети. Такое разделение задач позволяет существенно снизить вычислительную нагрузку, сохраняя при этом плавность видеопоследовательности.

Классические методы решения этой проблемы опираются на диффузию текстур и технику заплаток [3]. В рамках контекстного подхода [5] для заполнения прямоугольных областей применяется сверточный автокодировщик. Метод частичных сверток [6], в свою очередь, поддерживает работу с масками произвольной формы за счет динамической нормализации сверток по известным пикселям. Управляемые свертки [5] дополнительно вводят обучаемые ворота, определяющие достоверность каждого пикселя, что особенно важно при больших синтезируемых областях.

Задача, решаемая современным методом, принципиально отличается от привычного восстановления поврежденных изображений. Алгоритм работает как реставратор картины: вокруг прорехи есть контекст со всех сторон, и задача сводится к правдоподобной интерполяции. Здесь же синтезируемая область примыкает к кадру лишь с одной-двух сторон, а с остальных сторон – пустота. Модель вынуждена не восстанавливать утраченное, а генерировать новое, согласованное с тем, что уже есть.

Очевидно, сложность нарастает, при переходе от одного изображения, к видеопоследовательности, ведь к пространственной задаче добавляется временная. Синтезированные края соседних кадров должны быть согласованы между собой, иначе они будут «мерцать», структура будет разрываться от кадра к кадру, и глаз мгновенно это замечает. Было предложено решение на базе условных GAN [3]. Для видео задача усложняется требованием временной согласованности: работы [2, 5] используют 3D-свертки, однако требуют нескольких GPU для обучения обращения к нейронной сети.

Алгоритм Фарнебека [4] вычисляет плотный поток для каждого пикселя на основе полиномиальной аппроксимации окрестности. В отличие от разреженных методов, плотный поток пригоден для синтеза промежуточных кадров [7]

Общая схема метода включает четыре последовательных шага. Разбиение входного видео на отдельные кадры, затем осуществляется выбор ключевых кадров с заданной частотой f_k кадр/с, после этого происходит дотраивание каждого ключевого кадра с помощью U-Net, и последним шагом является интерполяция промежуточных кадров по оптическому потоку между соседними достроенными ключевыми кадрами.

Модель построена на основе архитектуры U-Net [5], адаптированной для прогрессивного метода дотраивания частей кадра с произвольной маской посредством управляемых сверток (Gated Convolutions) [5]. В отличие

от стандартных сверток, управляемые свертки вычисляют для каждого пикселя параметр, динамически определяющий, насколько соответствующая позиция является «достоверной» при вычислении признаков. Это позволяет корректно обрабатывать граничные области между известным и синтезируемым контентом.

Энкодер состоит из пяти блоков свертка–BN–ReLU с шагом $\text{stride} = 2$, последовательно уменьшающих пространственное разрешение с 256×256 до 8×8 . Декодер симметричен и использует транспонированные свертки для восстановления разрешения; пропускные соединения (skip-connections) конкатенируют карты признаков соответствующих уровней энкодера и декодера, сохраняя высокочастотные пространственные детали. Входом сети служит конкатенация изображения-холста и маски по каналу, итого 4 входных канала.

Функция потерь при обучении включает три компонента: потери восстановления в области маски; перцептуальную признаков слоев, стиля на основе матриц Грама признаков VGG-16. Перцептуальная и стилевая потери обеспечивают визуальное правдоподобие синтезируемых областей.

Обучение проводилось на подмножестве датасета Places365 [5] – 200 000 изображений природных и городских сцен. Синтетические маски генерировались как прямоугольные горизонтальные полосы, соответствующие целевому сценарию расширения. Оптимизатор AdamW, скорость обучения 10^{-4} , 100 эпох, размер пакета 8, GPU NVIDIA RTX 3060. При обращении к нейронной сети кадр масштабируется до 256×256 , результат возвращается к исходному разрешению билинейной интерполяцией.

Между двумя соседними ключевыми кадрами необходимо синтезировать промежуточных кадры. Для этого используется метод Фарнебека [5], вычисляющий плотное поле оптического потока. Вычисление выполняется на полутоновых версиях кадров. В основе алгоритма локальная полиномиальная аппроксимация яркости в окрестности каждого пикселя, что обеспечивает устойчивость к шуму и не требует нахождения точек соответствия явным образом [7].

Перестановка пикселей выполняется функцией `cv2.remap` с билинейной интерполяцией. Финальный промежуточный кадр формируется смешиванием деформированного и целевого кадров.

Смешивание с целевым кадром с весом компенсирует ошибки деформации, накапливающиеся при больших значениях смещения. Параметры алгоритма Фарнебека (`pyr_scale = 0,5`; `levels = 3`; `winsize = 15`; `iterations = 3`; `poly_n = 5`; `poly_sigma = 1,2`) выбраны по результатам следующих экспериментов.

Эксперименты проводились на 10 видеопоследовательностях длиной 5-10 с (1920×1080, 30 fps). Видео разделены на две группы: статичные сцены (6 видео – прогулки, городские пейзажи) и динамичные сцены (4 видео – активное движение объектов). Задача: переход 16:9 → 4:3, достраиваемая область составляет ~25 % по высоте (по 12,5 % сверху и снизу). Частота ключевых кадров 5 кадр/с, 5 промежуточных кадров между ключевыми. Основа достраиваемых кадров формируется вырезанием центральной области 4:3 из исходного видео; боковые полосы служат эталоном для достроенных областей.

Необходимо определить оптимальный размера окна, в пределах которого выполнится полиномиальная аппроксимация яркости при вычислении оптического потока. Оценка проведена на трех статичных видеопоследовательностях (1920×1080, 30 fps). Оценка PSNR и SSIM между интерполированным промежуточным кадром и соответствующим реальным кадром. Результаты в таблице 1; значение размера окна 15×15 выбрано как оптимальное.

ТАБЛИЦА 1. Зависимость качества интерполяции от размера окна

Размер окна	5×5	10×10	15×15	21×21
PSNR, дБ	27,9	31,1	32,3	29,93
SSIM	0,82	0,86	0,89	0,85

Предложенный метод сравнивался с тремя базовыми подходами: заполнением нулями (черные полосы), отражением крайних пикселей и контекстным достраиванием [5]. Все методы тестировались на одинаковом наборе данных. Результаты представлены в таблице 2.

ТАБЛИЦА 2. Сравнение методов достраивания ключевых кадров

Метод	PSNR, дБ	SSIM
Заполнение нулями	17,9	0,52
Отражение крайних пикселей	24,5	0,79
Контекстное достраивание	27,9	0,83
U-Net	30,1	0,83

Метод интерполяции на основе оптического потока сравнивался с линейной интерполяцией (попиксельное взвешенное усреднение без учета движения) и нейросетевым методом RIFE [5], результаты в таблице 3.

ТАБЛИЦА 3. Сравнение методов интерполяции промежуточных кадров

Метод	PSNR	SSIM	Время, с
Линейная интерполяция	29,1	0,83	0,02
Фарнебек	31,3	0,87	0,80
RIFE	33,1	0,91	0,15

В результате произведена адаптация U-Net к задаче достраивания фрагментов кадра с явной бинарной маской; разработана схема интерполяции через оптический поток для достроенных кадров; осуществлена количественная оценка метода с анализом ограничений

Метод Фарнебека превосходит линейную интерполяцию по обеим метрикам, не требуя GPU (время – 0,80 с/пара кадров на CPU Intel Core i7-10700). RIFE достигает более высокого качества, однако требует видеокарты. На динамичных сценах предложенный метод дает PSNR = 24,3 дБ, SSIM = 0,71 ввиду разрывов оптического потока в синтетических граничных областях.

Двухэтапная схема позволяет разделить вычислительно дорогой шаг (нейросетевое достраивание) и менее затратный шаг (интерполяция потоком). При $f_k = 5$ и исходных 30 fps количество обращений к U-Net сокращается в 6 раз по сравнению с полнокадровой обработкой. Этап интерполяции не требует GPU и выполняется за приемлемое время на CPU. Метод показывает удовлетворительные результаты только для сцен с медленным движением. На высокодинамичных сценах оптический поток между ключевыми кадрами, разнесенными на $\Delta = 6$ кадров, становится ненадежным предиктором: объекты, появляющиеся в синтетических областях, не имеют траектории в предыдущем ключевом кадре. Внутреннее разрешение U-Net фиксировано на 256×256 , что приводит к некоторому сглаживанию мелких деталей после обратного масштабирования. Направления дальнейших исследований: (а) адаптивный выбор f_k на основе оценки интенсивности движения; (б) замена алгоритма Фарнебека легкой дистиллированной моделью

интерполяции; (в) дообучение U-Net на масках произвольной конфигурации для расширения области применения.

Список используемых источников

1. Chang Y. et al. Free-Form Video Inpainting with 3D Gated Convolution // ICCV. 2019.
2. Sabini M., Rusak G. Painting Outside the Box: Image Outpainting with GANs // arXiv:1808.08483. 2018.
3. Ronneberger O. et al. U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation // MICCAI. 2015. P. 234–241.
4. Farneback G. Two-Frame Motion Estimation Based on Polynomial Expansion // SCIA. 2003. P. 363–370.
5. Pathak D. et al. Context Encoders: Feature Learning by Inpainting // CVPR. 2016. PP. 2536–2544.
6. Константинов А. А. Методы интерполяции кадров видеопоследовательности // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2019. № 2. С. 134–136. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metody-interpolyatsii-kadrov-videoposledovatelnosti> (дата обращения: 30.05.2026).
7. Criminisi A. et al. Region Filling and Object Removal by Exemplar-Based Image Inpainting // IEEE TIP. 2004. Vol. 13. PP. 1200–1212.

VIDEO OUTPAINTING METHOD BASED ON U-NET ARCHITECTURE AND OPTICAL FLOW INTERPOLATION

Morozova E., Fedorov S.

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

This paper addresses the problem of video outpainting – the synthesis of visual content beyond the original frame boundaries for the purposes of aspect ratio conversion and perspective correction. Unlike conventional inpainting methods, which are designed to fill relatively small regions surrounded by known content, the proposed approach targets the reconstruction of substantially larger areas located outside the original frame, where contextual information is available only from one or two sides, making the task considerably more challenging.

A two-stage pipeline is presented. In the first stage, a pretrained generative model based on the U-Net architecture completes key frames to the required spatial configuration by synthesizing the missing boundary regions given a binary mask. In the second stage, a dense optical flow field between consecutive key frames is estimated using a modified Gunnar Farneback algorithm, after which weighted pixel-level interpolation via spatial remapping is performed to generate intermediate frames, thereby ensuring temporal consistency of the output video sequence.

The method is evaluated on test video sequences featuring static and moderately dynamic scenes. Quantitative results are reported in terms of PSNR and SSIM metrics, and a comparison with baseline approaches is provided. The limitations of the proposed method with respect to highly dynamic scenes are discussed, along with directions for future improvement. The approach is applicable to video archive restoration tasks as well as to post-production video processing pipelines.

Key words: video outpainting, image inpainting, U-Net, video frame interpolation, deep learning

УДК 621.391

ГРНТИ 49.33.29

АДАПТИВНАЯ АКТИВАЦИЯ МНОГОКАНАЛЬНОЙ СВЯЗИ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СВЕРХНАДЕЖНОЙ СВЯЗИ С НИЗКОЙ ЗАДЕРЖКОЙ (URLLC)

С. Н. Нгуен, А. И. Парамонов

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В системах связи нового поколения активно развиваются услуги сверхнадежной передачи данных с малой задержкой, требующие одновременного обеспечения высокой вероятности успешной доставки коротких пакетов и крайне малого времени их доставки. Одним из эффективных решений данной задачи является многоканальная связь, позволяющая параллельно передавать одно и то же сообщение по нескольким независимым радиоканалам. Однако постоянная активация всех доступных каналов приводит к избыточному расходу радиоресурсов и росту нагрузки на сеть. В работе предложен алгоритм адаптивной активации многоканального режима, в котором дополнительные каналы подключаются только при близких значениях качества доступных каналов и при истощении временного бюджета передачи. Разработана математическая модель процесса передачи коротких пакетов, и проведено имитационное моделирование. Показано, что предложенный подход обеспечивает надежность, близкую к классической многоканальной связи, при существенно меньшем среднем расходе радиоресурсов.

URLLC, многоканальная связь, мультиподключение, короткие пакеты, надежность, задержка, 5G, 6G, finite blocklength, адаптивная активация каналов

Развитие сетей пятого и шестого поколений сопровождается появлением принципиально нового класса услуг – сверхнадежной связи с малой задержкой (Ultra-Reliable Low-Latency Communications, URLLC). Данный класс сервисов ориентирован на критически важные приложения, такие как промышленная автоматизация, тактильный интернет, удаленное управление и связь типа V2X, и характеризуется одновременным выполнением двух жестких требований: вероятности отказа на уровне 10^{-5} – 10^{-9} и сквозной задержки в пределах 1 – 10 мс при передаче коротких пакетов [1, 2]. Концепция сетей связи с ультрамалыми задержками подробно рассмотрена в [3], где показано, что обеспечение требований URLLC в условиях ограниченного частотно-временного ресурса является одной из центральных задач при проектировании сетей нового поколения.

Одним из ключевых механизмов повышения надежности передачи в URLLC является многоканальная связь (мультиподключение), при которой одно и то же сообщение передается параллельно по нескольким независимым радиоканалам [1, 2, 4]. Однако постоянное использование всех доступных каналов приводит к избыточному расходу радиоресурсов и росту нагрузки на сеть, что особенно критично при большом числе пользователей URLLC. Задача рационального распределения ресурсов между сервисами различных классов в сетях пятого поколения, включая URLLC, рассмотрена в [5]. В настоящей работе предлагается алгоритм адаптивной активации многоканального режима, обеспечивающий компромисс между надежностью и эффективностью использования спектра.

Рассматривается сценарий мультиподключения, в котором пользовательское устройство одновременно поддерживает связь с несколькими передающими узлами сети: макросотой, малыми сотами и другими передающими устройствами. В общем случае пользовательское устройство может использовать до N независимых каналов передачи. Каждый канал характеризуется собственным значением отношения сигнал-шум γ_i , при этом каналы предполагаются взаимно независимыми в смысле замираний.

Для описания процесса передачи коротких пакетов используется аппарат конечной длины блока, предложенный в [6]. Пропускная способность канала с гауссовым шумом при отношении сигнал-шум γ определяется выражением:

$$C(\gamma) = \log_2(1 + \gamma) \quad (1)$$

Дисперсия канала, учитывающая влияние конечной длины пакета:

$$V(\gamma) = \frac{1}{(\ln 2)^2} \left(1 - \frac{1}{(1+\gamma)^2}\right) \quad (2)$$

Необходимое для передачи пакета длиной L бит число ресурсов с заданной вероятностью ошибки P_e оценивается по приближенной формуле:

$$R \approx \frac{L}{C(\gamma)} + \frac{Q^{-1}(P_e)^2 V(\gamma)}{2C(\gamma)^2} \left[1 + \sqrt{1 + \frac{4LC(\gamma)}{Q^{-1}(P_e)^2 V(\gamma)}}\right] \quad (3)$$

где $Q^{-1}(\cdot)$ – обратная хвостовая функция стандартного нормального распределения. Соответствующая вероятность ошибки при выделении R_l ресурсов составляет:

$$P_e = Q\left(\frac{R_l C - L}{\sqrt{R_l V}}\right) \quad (4)$$

При параллельной передаче по N независимым каналам пакет считается потерянным только в случае одновременной неудачи на всех каналах:

$$P_{loss} = \prod_{i=1}^N P_{e,i} \quad (5)$$

Задержка доставки определяется наиболее ранним успешным приемом среди всех активных каналов:

$$T_{\text{дост}} = \min_{i=1,\dots,N} T_i \quad (6)$$

где T_i – время доставки пакета по i -му каналу.

Основная идея предлагаемого алгоритма заключается в том, что дополнительные каналы активируются не постоянно, а только при необходимости, в зависимости от качества доступных каналов и оставшегося временного бюджета передачи. На начальном этапе передача осуществляется по основному каналу с наилучшим значением отношения сигнал-шум. Многоканальный режим включается в том случае, когда одновременно выполнены два условия: разница качества доступных каналов не превышает заданного порога, а оставшийся временной бюджет передачи становится сопоставимым с пороговым значением. Формально условие активации многоканального режима записывается следующим образом:

$$\text{Режим}_{MC} = \begin{cases} 1, & \Delta SNR \leq \Delta_{MC} \wedge B_k \leq \tau \\ 0, & \text{иначе} \end{cases} \quad (7)$$

$$\Delta SNR = |SNR_i - SNR_j|, B_k = B_0 - k \cdot RTT$$

где B_0 – начальный временной бюджет передачи; B_k – оставшийся бюджет после k -й попытки; RTT – длительность одного цикла повторной передачи; τ – пороговое значение оставшегося бюджета, при котором запускается мультиподключение; Δ_{MC} – допустимая разница качества каналов. Условие $\Delta SNR \leq \Delta_{MC}$ гарантирует, что подключаемые дополнительные каналы обеспечат реальный выигрыш по надежности, а не приведут лишь к расходу ресурсов при заведомо худшем отношении сигнал-шум. Условие $B_k \leq \tau$ означает, что система откладывает активацию мультиподключения до момента, когда дальнейшее ожидание делает срыв временного бюджета вероятным. Таким образом, алгоритм сочетает экономию ресурсов одноканальной передачи с надежностью многоканальной только в ситуациях, когда это действительно требуется.

Для оценки эффективности предложенного алгоритма было проведено имитационное моделирование в сценарии передачи коротких пакетов дли-

ной 256 бит. Значения отношения сигнал-шум в диапазоне от -1 до 15 дБ для имитации различных условий приема в основной и в малой соте. Допустимая разница качества каналов Δ_{MC} принималась равной 3 дБ, пороговое значение оставшегося бюджета $\tau = 4 RTT$, длительность одного цикла повторной передачи $RTT = 0,25$ мс, начальный временной бюджет передачи 8 RTT , максимальное число доступных 2500 ресурсов. Сравнительный анализ выполнен для трех схем передачи: одиночной связи, классической многоканальной связи с постоянной активацией двух каналов и предложенной адаптивной многоканальной связи.

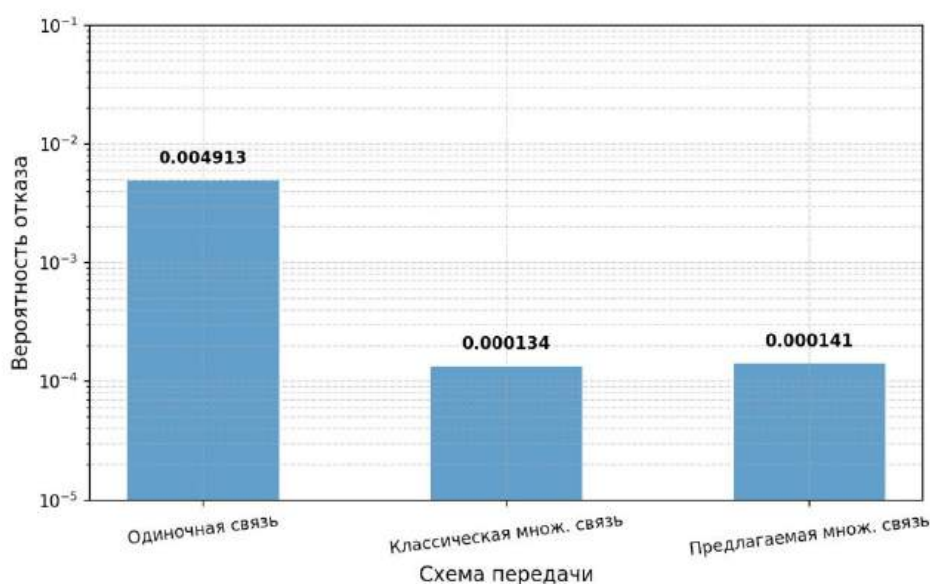


Рис. 1. Вероятность отказа

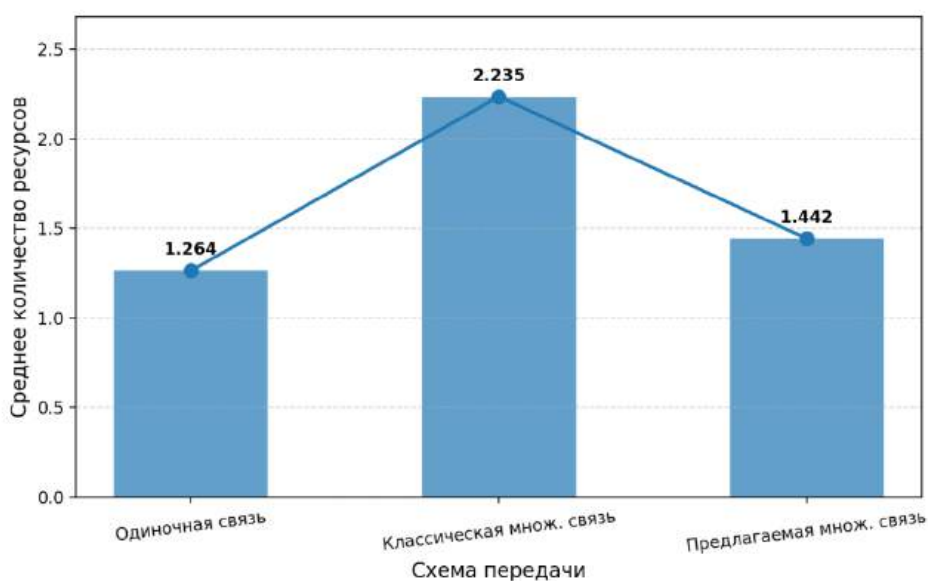


Рис. 2. Среднее число ресурсов на пользователя

Из рис. 1 и рис. 2 видно, одиночная связь обеспечивает вероятность отказа на уровне $4,9 \cdot 10^{-3}$, классическая многоканальная связь снижает данный показатель до $1,34 \cdot 10^{-4}$, однако среднее число занимаемых ресурсов возрастает с 1264 до 2235, то есть почти в 1,77 раза. Предложенный алгоритм адаптивной активации обеспечивает вероятность отказа $1,41 \cdot 10^{-4}$, практически совпадающую с показателем классической многоканальной связи, при этом среднее число занимаемых ресурсов составляет 1442, что соответствует сокращению расхода ресурсов приблизительно на 35,5 % по сравнению с классической схемой при сопоставимой надежности.

В данной работе рассмотрена задача обеспечения требований сверхнадежной связи с малой задержкой при передаче коротких пакетов с использованием механизма мультиподключения. Показано, что постоянная активация всех доступных каналов, обеспечивая высокую надежность, приводит к существенному избыточному расходу радиоресурсов. Предложен алгоритм адаптивной активации многоканального режима, в котором дополнительные каналы подключаются только при близком качестве доступных каналов и истощении временного бюджета передачи. Результаты имитационного моделирования подтверждают, что предложенный подход обеспечивает вероятность отказа, близкую к классической многоканальной связи, при существенно меньшем среднем расходе радиоресурсов. Тем самым достигается рациональный компромисс между надежностью и эффективностью использования спектра, что особенно актуально для масштабируемого развертывания сервисов URLLC в сетях пятого и шестого поколений.

Список используемых источников

1. Paramonov A., Kashkarov D., Muthanna A., Koucheryavy A., Peng J., Elgendy I.A., Maleh Y., Abd El-Latif A.A. Study and Analysis of Multiconnectivity for Ultrareliable and Low-Latency Features in Networks and V2X Communications // *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2021, T. 2021, P. 1718099.
2. Кашкаров Д. В., Кучерявый А. Е. Анализ приложений и перспектив развития технологий граничных вычислений с множественным доступом в сетях связи // *Информационные технологии и телекоммуникации*. 2020. Том 8. № 1. С. 28–33.
3. Кучерявый А. Е. Сети связи с ультрамалыми задержками // *Труды НИИР*. 2019. № 1.
4. Кашкаров Д. В., Парамонов А. И., Кучерявый А. Е. Метод повышения эффективности uRLLC в перспективных сетях связи // *Электросвязь*. 2022. № 2. С. 32–37.
5. Popovski P., Trillingsgaard K. F., Simeone O., Durisi G. 5G Wireless Network Slicing for eMBB, URLLC, and mMTC: A Communication-Theoretic View // *IEEE Access*. 2018. Vol. 6. PP. 55765-55779. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2872781.

6. Polyanskiy Y., Poor H. V., Verdu S. Channel Coding Rate in the Finite Blocklength Regime // IEEE Transactions on Information Theory. 2010. Vol. 56, N 5. PP. 2307-2359. DOI: 10.1109/TIT.2010.2043769.

ADAPTIVE ACTIVATION OF MULTI-CONNECTIVITY FOR ULTRA-RELIABLE LOW-LATENCY COMMUNICATIONS (URLLC)

Paramonov A., Nguyen N.

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

Next generation communication systems are witnessing the rapid development of ultra reliable low latency data transmission services, which require the simultaneous provision of a high successful delivery probability for short packets and an extremely short transmission time. One of the effective solutions to this problem is multi-connectivity, which enables the same message to be transmitted in parallel over several independent radio channels. However, permanent activation of all available channels leads to excessive consumption of radio resources and an increased load on the network. This paper proposes an algorithm for adaptive activation of the multi-channel mode, in which additional channels are engaged only when the quality of the available channels is close to that of the best channel and when the remaining transmission time budget is nearly exhausted. A mathematical model of the short packet transmission process is developed, and a simulation study is carried out. It is shown that the proposed approach provides reliability close to that of classical multi-connectivity while substantially reducing the average consumption of radio resources.

Key words: URLLC, multi-channel communication, multi-connectivity, short packets, reliability, latency, 5G, 6G, finite blocklength, adaptive channel activation

УДК 621.396.969

ГРНТИ 47.49.31

ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ И ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ БАЗЫ ДАННЫХ В ЗАДАЧАХ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ МЕТОДОМ РАДИООТПЕЧАТКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛЕЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН

А. С. Павлов, Г. А. Фокин

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Работа является продолжением исследования принципов организации корреляционной базы данных для позиционирования методом радиоотпечатка. В отличие от ранее рассмотренного эмпирического подхода, здесь основное внимание уделяется построению корреляционной базы данных на основе моделей распространения радиоволн. Детально описан процесс формирования эталонных радиоотпечатков с использованием эмпирической модели Окамура–Хата и цифровой модели рельефа, включая расчет уровня принимаемого сигнала и задержки распространения. Рассмотрена процедура калибровки базы данных по результатам полевых измерений.

метод радиоотпечатка, корреляционная база данных, позиционирование

Метод радиоотпечатка (РО) опирается на наличие корреляционной базы данных (КБД), покрывающей всю рабочую область, каждая запись которой связывает координаты точки пространства с вектором измеренных или предсказанных радиопараметров – эталонным радиоотпечатком (ЭРО, r). В предыдущей работе были подробно рассмотрены базовые структуры КБД (индексированный список и равномерная сетка), а также эмпирический способ ее наполнения путем прямых измерений. Такой подход обеспечивает наилучшее соответствие реальной радиообстановке, однако страдает от быстрого устаревания при любых изменениях в сети и требует значительных затрат на повторные измерительные мероприятия. Альтернативой служит построение КБД с использованием математических моделей распространения радиоволн [1]. Главное достоинство этого подхода – простота и дешевизна актуализации: при изменениях в радиоподсистеме достаточно повторно выполнить расчет, чтобы получить обновленную базу данных [2].

Математические модели распространения радиоволн принято делить на два основных класса: детерминированные (например, трассировка лучей) и эмпирические. Детерминированные модели требуют чрезвычайно детального описания среды в следствие чего, характеризуются высокой вычислительной сложностью. Напротив, эмпирические модели получены в результате статистической обработки большого числа полевых измерений и представляют потери на трассе в виде параметрических уравнений. Они значительно менее ресурсоемки и, хотя уступают детерминированным в точности, все же обеспечивают погрешность, сравнимую с типичной точностью большинства методов РО для позиционирования вне помещений [2].

Одной из наиболее известных эмпирических моделей является модель Окамура–Хата, но в ее исходной формулировке не учитывается дифракция на рельефе и зданиях [2]. Для этого вводится матрица **H**:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} m_{1,1} & \cdots & m_{i,1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ m_{1,j} & \cdots & m_{i,j} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где $m_{i,j}$ – средняя высота поверхности в координатах с индексами i, j , $i = 1, 2, \dots, \left\lfloor \frac{l}{a_H} \right\rfloor, j = 1, 2, \dots, \left\lfloor \frac{w}{a_H} \right\rfloor$.

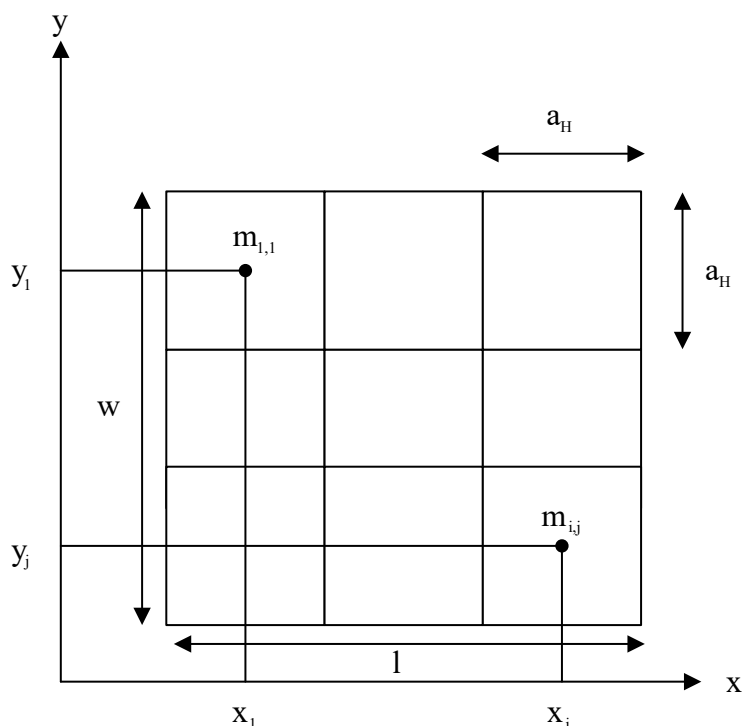


Рис. 1. Графическое представление матрицы **H**

Для учета явления огибания волн модель необходимо модифицировать. Для этого территорию обслуживания представляют цифровой моделью рельефа (ЦМР), которая является матрицей $\mathbf{H}$ (1) и содержит элементы $m_{i,j}$ в пределах квадрата со стороной a_H , что тождественно пространственному разрешению ЦМР. Эта матрица также может содержать высоту зданий, прибавленную к высоте рельефа. Если регион имеет размеры $l \times w$ м², то размер матрицы составляет $\left\lfloor \frac{l}{a_H} \right\rfloor * \left\lfloor \frac{w}{a_H} \right\rfloor$ элементов, что графически отображено на рисунке 1. Определить местоположение можно по формуле:

$$(x_i, y_j) = (x_1 + a_H(i - 1), y_1 - a_H(i - 1)), \quad (2)$$

где x_1, y_1 – известные координаты первого элемента, a_H – пространственное разрешение, $i = 1, 2, \dots, \left\lfloor \frac{l}{a_H} \right\rfloor, j = 1, 2, \dots, \left\lfloor \frac{w}{a_H} \right\rfloor$.

При использовании прямоугольной картографической проекции, например, универсальной поперечной Меркатора, координаты x_i, y_i произвольного элемента $m_{i,j}$ могут быть вычислены, если известны координаты первого элемента матрицы, который располагается в северо-западном углу (2). Модифицированная формула потерь:

$$L_{i,j,k} = \alpha_1 + \alpha_2 * \log_{10}(s_{i,j,k}) + \alpha_3 * \log_{10}(h_k) + \alpha_4 * d_{i,j,k} + \alpha_5 * \log_{10}(h_k) * \log_{10}(s_{i,j,k}), \quad (3)$$

где h_k – высота k -й антенны в метрах, $s_{i,j,k}$ – расстояние в метрах между позициями k -й антенной (x_k, y_k) и элемента КБД (x_i, y_j) , α_n – коэффициенты зависящие от морфологии местности и рабочей частоты, $d_{i,j,k}$ – дифракционные потери.

Для каждого k -го передатчика и каждого элемента КБД из ЦМР извлекается профиль трассы. С помощью специальных моделей (Эпштейна–Петерсона, Биллингтона, Дейгоу и др.) рассчитываются дополнительные дифракционные потери $d_{i,j,k}$, а затем средние потери на трассе $L_{i,j,k}$ в дБ (3) [1]. Эталонное значение уровня принимаемого сигнала (RSS) записывается в следующем виде:

$$RSS_{i,j,k} = EIRP_{i,j,k} - L_{i,j,k}, \quad (4)$$

где $EIRP_{i,j,k}$ – ЭИИМ канала управления k -м передатчиком в направлении (i, j) , $L_{i,j,k}$ – потери при распространении сигнала между k -м передатчиком и точкой (i, j) .

Зная выходную мощность передатчика, потери в фидерах, а также вертикальную и горизонтальную диаграммы направленности антенны, определяют эффективную изотропно-излучаемую мощность (ЭИИМ) k -го передатчика в направлении элемента (i, j) . по формуле (4). Если есть возможность измерить круговую задержку сигнала, то ее представляют в следующем виде:

$$RTD_{i,j,k} = \left\lfloor \frac{2 * s_{i,j,k}}{c * T_s} \right\rfloor, \quad (5)$$

где $s_{i,j,k}$ – расстояние в метрах между позициями k -й антенной (x_k, y_k) и элемента КБД (x_i, y_j) , c – скорость света, T_s – длительность символа.

Величина задержки распространения сигнала (RTD) при условии прямой видимости оценивается выражением (5). Итоговый ЭРО:

$$\mathbf{R}_{i,j} = \begin{bmatrix} ID_{i,j,1} & RSS_{i,j,1} & RTD_{i,j,1} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ ID_{i,j,n_{i,j}} & RSS_{i,j,n_{i,j}} & RTD_{i,j,n_{i,j}} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

где $ID_{i,j,n_{i,j}}$ – идентификатор k -й ячейки, $RSS_{i,j,n_{i,j}}$ – уровень сигнала k -й ячейки, $RTD_{i,j,n_{i,j}}$ – круговая задержка сигнала k -й ячейки.

После того как для всех передатчиков, чей предсказанный уровень RSS превышает порог чувствительности приемника, вычислены RSS и RTD , формируется ЭРО [3]. Строки матрицы $\mathbf{R}_{i,j}$ классифицируются в порядке убывания RSS (6). КБД формируется в соответствии с выражением:

$$\left((i, j), \mathbf{R}_{i,j} \right) \mapsto \left((i * a_H + x_1, j * a_H + y_1), \mathbf{R}_{i,j} \right), \quad (7)$$

где $\mathbf{R}_{i,j}$ – ЭРО, a_H – пространственное разрешение, x_1, y_1 – известные координаты первого элемента, $i = 1, 2, \dots, \left\lfloor \frac{l}{a_H} \right\rfloor, j = 1, 2, \dots, \left\lfloor \frac{w}{a_H} \right\rfloor$.

Полная КБД образуется после вычисления $\mathbf{R}_{i,j}$ (6) для всех индексов (i, j) , т.е. для всех элементов области обслуживания. Такая КБД имеет структуру равномерной сетки, а каждая ее запись параметризуется индексами (7) [3].

Для повышения точности выполняют калибровочный маршрут (драйв-тест), в ходе которого регистрируются как координаты точек, так и измеренные в них значения RSS для каждого обнаруженного передатчика. Каждую точку маршрута привязывают к тому элементу равномерной сетки КБД, в который она попадает географически. Для каждого такого элемента

вычисляют средние значения RSS передатчика. Далее формируется матрица измеренных значений:

$$\mathbf{T}_n = \begin{bmatrix} ID_{n,1} & RSS_{n,1} \\ \vdots & \vdots \\ ID_{n,N_n} & RSS_{n,N_n} \end{bmatrix}, \quad (8)$$

где ID_{n,N_n} – идентификатор n -й точки измерения, RSS_{n,N_n} – уровень сигнала n -й точки измерения, N_n – число передатчиков, обнаруженных в n -й точке измерения.

В результате формируется набор средних измеренных значений, индексируемый тройкой $(i_n, j_n, \mathbf{T}_n)$, где (i_n, j_n) – индексы n -ой точки измерения на маршруте, а матрица $\mathbf{T}_n$ (8) содержит идентификаторы передатчиков и соответствующие им средние измеренные RSS . Затем происходит вычисление рассогласования, в соответствии со следующими условиями:

$$\mathbf{T}_n(k, 1) = \mathbf{R}_{i,j}(k', 1) = ID_k \quad (9)$$

$$(i_n, j_n) = (i, j) \quad (10)$$

для

$$p_{n,k} = \mathbf{T}_n(k, 2) - \mathbf{R}_{i,j}(k', 2), \quad (11)$$

где ID_k – идентификатор k -го передатчика, $\mathbf{R}_{i,j}$ – ЭРО, $\mathbf{T}_n$ – матрица измеренных значений, $i = 1, 2, \dots, \left\lfloor \frac{l}{a_H} \right\rfloor, j = 1, 2, \dots, \left\lfloor \frac{w}{a_H} \right\rfloor, p_{n,k}$ – значение ошибки для k -го передатчика в n -той точке калибровочного маршрута.

При условии, что идентификаторы передатчиков в матрицах $\mathbf{T}_n$ и $\mathbf{R}_{i,j}$ совпадают (9) и координаты измеренных значений имеют соответствующие в смоделированной области (10). Вычисляется ошибка (рассогласование) между предсказанными и измеренными значениями (11). Затем вводится коррекция:

$$\mathbf{C}_k = (\mathbf{V}^T \times \mathbf{V})^{-1} \times \mathbf{V}^T \times \mathbf{p}_k, \quad (12)$$

где $\mathbf{p}_k$ – вектор разностей между измеренными и предсказанными значениями RSS для k -го узла, $\mathbf{V}$ – матрица-столбец из единиц.

Калибровка выполняется индивидуально для каждого передатчика: ищется такая корректирующая добавка $\mathbf{C}_k$ (11), которая минимизирует сумму квадратов разностей между измеренными и предсказанными значениями RSS на всех точках маршрута, где данный передатчик был зафиксирован. Найденный коэффициент $\mathbf{C}_k$ добавляют к предсказанным потерям

на трассе $L_{i,j,k}$ для всех элементов КБД, корректируя тем самым эталонные значения RSS данного передатчика на всей территории обслуживания [1].

Таким образом, применение эмпирической модели Окамура–Хата совместно с цифровой моделью рельефа позволяет сформировать КБД с регулярной сеточной структурой и рассчитать эталонные значения RSS и RTD . Такая КБД легко обновляется при изменениях в сети, что выгодно отличает ее от чисто эмпирических баз. Процедура калибровки по данным драйв-теста обеспечивают дополнительное повышение точности предсказанных значений и, как следствие, точности позиционирования. Дальнейшие исследования будут направлены на исследование метрик сходства в методе радиоотпечатка.

Список используемых источников

1. Campos R. S., Lovisolo L. RF Positioning: Fundamentals, Applications, and Tools. Norwood: Artech House, 2015. 375 p. (Mobile Communications Series). ISBN 978-1-60807-816-5.
2. Фокин, Г. А. Технологии сетевого позиционирования 5G [монография] / Г. А. Фокин; СПбГУТ. СПб., 2021. 400 с.
3. Zimmermann D., Baumann J., Layh A. et al. Database Correlation for Positioning of Mobile Terminals in Cellular Networks using Wave Propagation Models // Proc. IEEE VTC. 2004. PP. 4682–4686.

FUNDAMENTALS OF BUILDING AND OPERATING A CORRELATION DATABASE IN RADIO FINGERPRINT POSITIONING TASKS USING RADIO WAVE PROPAGATION MODELS

Pavlov A., Fokin G.

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

This work is a continuation of the study of the principles of organizing a correlation database for positioning using the radio fingerprint method. Unlike the previously discussed empirical approach, this paper focuses on building a correlation database based on radio wave propagation models. It provides a detailed description of the process of generating reference radio fingerprints using the Okamura-Hata empirical model and a digital elevation model, including the calculation of the received signal level and propagation delay. The paper also discusses the calibration of the database based on field measurement results.

Key words: radio fingerprinting, correlation database, positioning

УДК 631.1.017
ГРНТИ 49.37.33

УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ УСЛУГ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ВИДЕОКОНФЕРЕНЦСВЯЗИ ПУТЕМ ВЫБОРА ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕДАЧИ МЕДИА ДАННЫХ

А. И. Парамонов, Н. А. Штырляев

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В работе проведен анализ задач организации голографической видеоконференцсвязи и факторов, влияющих на параметры трафика данной услуги. Приведена постановка задачи выбора параметров сжатия видеопотоков как задачи оптимизации и рассмотрены три варианта постановки этой задачи: как задачи максимизации качества, минимизации скорости передачи данных или достижения желаемого качества. Определены задачи дальнейшего исследования в части определения набора параметров и методов оценки качества восприятия голографической видеоконференцсвязи.

битрейт, частота кадров, разрешение видео изображение, частота дискретизации звука, адаптивное кодирование, пропускная способность канала, минимизация задержек

Развитие технологий связи отражается в качественных изменениях предоставляемых услуг. Эти изменения, ведут к повышению показателей качества восприятия услуг. В частности, повышение качества услуг передачи видео лежит как в плоскости повышения качества передаваемой картинки, так и в плоскости повышения иммерсивности услуг. Понятие иммерсивности характерно для услуг передачи и представления медиа данных, т.е. изображений и звука. Для повышения иммерсивности видео известны подходы использования 3D видео [1]. В последнее время это направление получило развитие в развитии услуг голографической связи (НТС – Holographic Type Communications) [2].

Приведенное понятие НТС не в полной мере соответствует распространенному толкованию термина «голография» [2], которое подразумевает восприятие человеком трехмерного изображения, записанного в виде интерференции световых волн. НТС в некотором смысле расширяет это понятие, акцентируя смысл не на физическом принципе реализации, а на восприятии. Важное отличие НТС от упомянутых 3D технологий состоит в построении такого изображения, которое изменяется при изменении положения наблюдателя. Иными словами, на голографическое изображение можно взглянуть сбоку или даже обойти его сзади.

В данной работе термин «голография» будет использоваться именно в этом смысле. В работе не рассматриваются конкретные модели терминалов голографической связи. В настоящее время их ассортимент весьма ограничен и эти устройства могут существенно отличаться друг от друга.

Одной из прикладных областей применения НТС является видеоконференцсвязь (ВКС). Услуги ВКС в настоящее время получили широкое распространение в различных областях. Существенным толчком к их развитию явился период пандемии коронавируса 2020-2023 гг. После его завершения интерес к этим услугам сохранился.

Сочетание ВКС и НТС позволяет повысить иммерсивность услуги, что имеет существенное значение в ряде областей. Например, применение НТС в сфере образования позволяет повысить восприятие материала в процессе обучения [2]. Поэтому, приложения в сфере образования могут стать существенным стимулом развития НТС.

Известные способы получения голографических изображений [3] предполагают формирование нескольких видеопотоков, что может приводить к многократному повышению интенсивности трафика НТС, по сравнению с обычным видео.

Формирование видеопотоков двумерного изображения достаточно хорошо изучено и известно влияние параметров формирования видеопотока на качество восприятия [2]. Вероятно, формирование видеопотока НТС будет иметь свою специфику из-за особенностей восприятия человеком трехмерного изображения.

Целью данной работы является постановка задачи формирования НТС видеопотока.

Формирование НТС видеопотока

Процесс голографической видеосвязи начинается с захвата изображения. Для получения трехмерного представления объекта используется комплекс из множества камер, расположенных вокруг него. Эти камеры должны охватывать объект со всех сторон, создавая плотное поле наблюдения. Количество камер варьируется в зависимости от желаемого уровня детализации: от 8-16 в простых системах до 32, 64 и более в продвинутых [2]. Для точного воссоздания формы объекта также применяются датчики глубины, такие как LiDAR или системы структурированного света. Все камеры работают синхронно, а собранные данные отправляются на обработку (рис. 1). При обработке с помощью алгоритмов компьютерного зрения и методов

фотореалистичной реконструкции, они объединяются в единую трехмерную модель.

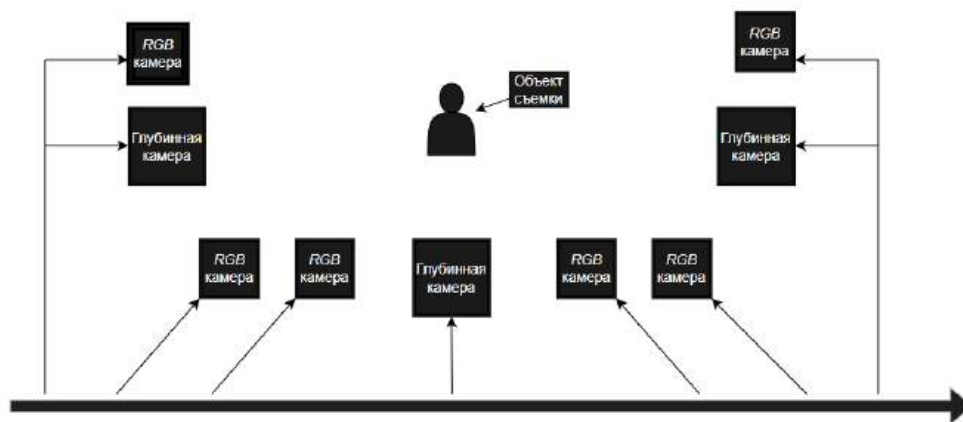


Рис. 1. Формирование НТС видеоконтента

Трафик НТС: многопоточная передача данных

Голографическая видеоконференцсвязь генерирует значительно больший объем трафика по сравнению с традиционными видеосистемами (рис. 2). Если обычная видеоконференция использует один видео- и один аудиопоток, то голографическая система оперирует множеством потоков. При использовании 16 камер создается 16 синхронизированных видеопотоков, к которым добавляются данные о глубине, текстурах и звуке. Общее количество потоков может достигать 20-50 или даже более, в зависимости от сложности системы и детализации голографической сцены. Для передачи такого объема данных может использоваться формат контейнера MPEG-4.

В рамках контейнера могут применяться различные кодеки (например, H.264 или H.265) для эффективного сжатия видеоданных.

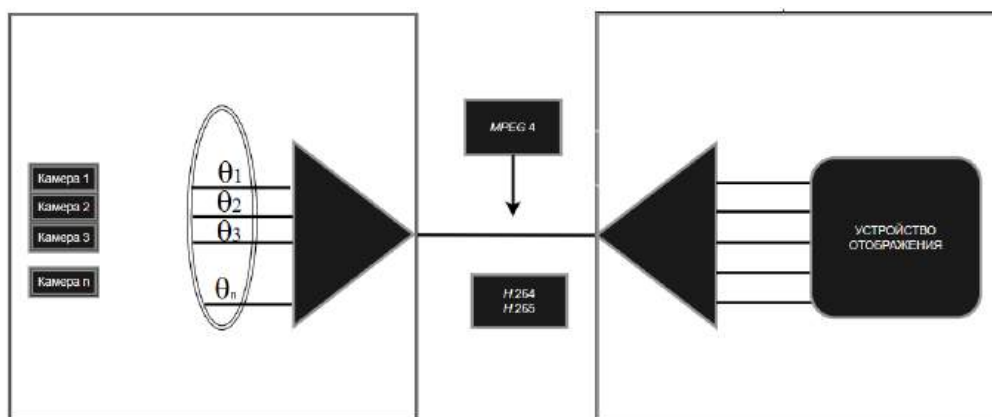


Рис. 2. Трафик НТС

Как правило, эффективное сжатие видеоданных достигается при допущении потерь исходной информации. Выбор допустимой величины потерь информации является важнейшей задачей, решаемой при формировании видеопотока. При решении задачи сжатия данных встает задача выделения доминантной информации [2] и информации не критичной (менее критичной) для качества восприятия.

Доминантная информация – это информация, в наибольшей степени влияющая на качество восприятия видео человеком.

Для сжатия видеоданных используют, как правило, пространственное и временное сжатие. Если для однопоточкового видео связь этих параметров с качеством восприятия достаточно хорошо изучена, то для голографического видео эта задача требует исследований, устанавливающих эту связь для каждого из видеопотоков.

В общем случае, такую задачу можно рассматривать как задачу оптимизации, которая может быть сформулирована различными способами.

Рассмотрим следующую модель. Будем полагать, что для реализации НТС используется n потоков видеоданных. Каждый из потоков характеризуется набором параметров сжатия θ_i , $i = 1 \dots n$. Качество восприятия изображения описывается множеством показателей P_{QoE} . Целевой уровень качества восприятия характеризуется множеством значений показателей P_0 . Максимально допустимая скорость передачи НТС потока C_0 .

Тогда задачу выбора значений параметров сжатия для всех потоков можно рассмотреть, как задачу минимизации разницы между показателями качества восприятия и их целевыми значениями путем изменения значений параметров сжатия при ограничении на максимальную скорость передачи суммарного потока

$$\{\theta_1 \dots \theta_n\} = \arg \min_{\substack{\theta_i \\ i=1 \dots n}} d(P_{QoE}(\theta_i, C), P_0), \quad C \leq C_0 \quad (1)$$

где $d(*, *)$ – функция, характеризующая отличие между двумя множествами значений показателей качества.

Вторая возможная формулировка может быть представлена как задача максимизации качества восприятия путем выбора значений параметров сжатия при ограничении максимальной скорости передачи данных

$$\{\theta_1 \dots \theta_n\} = \arg \max_{\substack{\theta_i \\ i=1 \dots n}} \varphi(P_{QoE}), \quad C \leq C_0 \quad (2)$$

где $\varphi(*,*)$ – функция, характеризующая интегральный показатель качества восприятия.

Третья возможная формулировка может быть представлена как задача минимизации скорости передачи данных НТС потока при допустимом уровне качества

$$\{\theta_1 \dots \theta_n\} = \arg \min_{\substack{\theta_i \\ i=1 \dots n}} C(\theta_i), \quad \varphi(P_{QoE}) \geq \varphi_0 \quad (3)$$

где φ – допустимое значение интегрального показателя качества.

Решениями всех задач являются множества параметров сжатия для всех видеопотоков. Задача (1) дает возможность получить наиболее близкое к желаемому качество восприятия, при не превышении заданной скорости передачи данных. Задача (2) позволяет получить максимум качества при заданной скорости передачи данных, а задача (3) – минимизировать скорость передачи при допустимом уровне качества.

Выбор той или иной формулировки зависит от конкретных условий. Если известны целевые показатели качества и максимально допустимая скорость, то следует выбрать (1), если целевые показатели не известны, то (2), если стоит задача минимизации ресурсов, то (3).

Как видно из постановки задач, для их решения требуется определение множества параметров сжатия видеопотоков $\theta_i, i = 1 \dots n$, множества показателей качества восприятия P_{QoE} , функций, характеризующих отличие между двумя множествами значений показателей качества, а также функции, характеризующей интегральный показатель качества восприятия.

При достаточно большом n и использовании для оценки качества восприятия метода экспертных оценок, например, решение задач (1) ... (2) становится весьма трудоемким. Представляется, что для дальнейших исследований оценку параметров качества восприятия целесообразно выполнять некоторым объективным методом без привлечения экспертов. Поэтому, необходима и разработка объективного метода оценки показателей качества восприятия услуг НТС. Применение НТС в ВКС повышает иммерсивность, но требует агрегирования множества видеопотоков.

Список используемых источников

1. Immersive Video & VR. Текст: электронный // dacast.com [сайт]. – URL: <https://www.dacast.com/blog/immersive-video-vr/> (дата обращения: 15.05.2026)

2. Holographic. Текст: электронный // ResearchGate: [сайт]. URL: https://www.researchgate.net/publication/364147787_Holographic-type_communication_A_new_challenge_for_the_next_decade(дата обращения: 15.05.2026).

3. Что такое голограмма, где используется и какой у нее принцип работы. Текст: электронный // Mail.ru: [сайт]. URL: <https://hi-tech.mail.ru/review/63212-hologram/#anchor203949> (дата обращения: 15.05.2026).

MANAGING THE QUALITY OF HOLOGRAPHIC VIDEO CONFERENCING SERVICES BY SELECTING MEDIA TRANSMISSION PARAMETERS

Paramonov A., Shtyrlyayev N.

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

The paper analyzes the tasks of organizing holographic video conferencing and the factors that affect the traffic parameters of this service. It presents the problem of selecting video compression parameters as an optimization problem and discusses three approaches to solving this problem: maximizing quality, minimizing data transfer rate, or achieving desired quality. The paper also identifies further research objectives, such as determining the set of parameters and methods for evaluating the quality of holographic video conferencing.

Key words: *bitrate, frame rate, video resolution, audio sample rate, adaptive encoding, channel bandwidth, and latency minimization*

УДК 621.396.4

ГРНТИ 50.37.03

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЙ ВЫБОР ПРЕДПОЧТЕНИЙ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ЯВНЫХ И НЕЯВНЫХ ЭКСПЕРТНЫХ ЗНАНИЙ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ РЕЛЕВАНТНОГО ИНФОРМАЦИОННОГО ПОИСКА НА РЕСУРСАХ ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ

И. Б. Паращук, Л. А. Саяркин, В. Б. Цыпнятов

Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного

Рассмотрены некоторые особенности, этапы и условия использования явных и неявных экспертных знаний в сочетании с методами теории нечетких множеств, как математического и методологического инструмента для обоснованного многокритериального выбора и последующего учета предпочтений пользователей при практической реализации релевантного информационного поиска на ресурсах современных инфокоммуникационных систем. Предложенный подход использует явные и неявные знания экспертов для формулировки и описания лингвистических переменных в интересах формального описания и корректного математического расчета показателей «веса», приоритетности поисковых предпочтений пользователей. Использование данного подхода, на наш взгляд, позволит повысить не только релевантность, но и оперативность и пертинентность информационного поиска.

инфокоммуникационная система, эксперт, явные и неявные знания, функция принадлежности, информационный поиск, предпочтения пользователя, релевантность, ресурс

Тренд на «цифровую трансформацию» обуславливает все более широкое распространение в практической сфере современных автоматизированных инфокоммуникационных систем (ИКС) для хранения и обработки «Больших Данных», например, таких, как многоуровневые базы данных, распределенные дата-центры (включая программно-определяемые дата-центры) и крупные облачные хранилища [1-3].

Задачам эффективной работы таких ИКС, задачам доступа к данным, хранящимся и обрабатываемым на ресурсах (серверах, коммутаторах, автоматизированных рабочих местах и т.д.) подобных систем, а также вопросам обеспечения защищенности этих данных, вопросам контроля и предотвращения инцидентов информационной безопасности в ИКС, посвящены мно-

гие актуальные теоретические, методологические и технологические исследования [4, 5].

Наряду с этими задачами, при эксплуатации ИКС, а точнее, при практической реализации процедур информационного поиска на ресурсах таких систем, зачастую возникает важная тема, требующая, по нашему мнению, пристального внимания исследователей и администраторов поисковых инструментов, специалистов по эффективной реализации поисковых запросов пользователей. Речь идет о задаче многокритериального выбора и учета предпочтений пользователей при реализации релевантного информационного поиска на ресурсах ИКС.

С учетом того известного факта, что реализация поисковых запросов представляет собой процесс нахождения, выявления, отбора и выдачи пользователю из большого массива данных соответствующих запросу необходимых конкретных сведений или документов, нетривиальность задачи информационного поиска в «Больших Данных» связывают с тем, что он должен быть направлен на удовлетворение строго определенной и четко сформулированной информационной потребности пользователей, результаты поиска должны быть релевантными [6, 7].

Здесь и кроется проблема: зачастую приоритеты пользователей при формулировке формализованной заявки на информационный поиск с помощью поисковых подсистем на ресурсах ИКС не просто не соответствуют требованиям по строгому определению и четкой формулировке конкретной информационной потребности, но и являются заведомо, изначально неопределенными, нечеткими, а иногда, даже противоречивыми по своей сути. Именно поэтому продолжает оставаться актуальной задача формирования механизмов, нацеленных на релевантный информационный поиск с максимальным соответствием запросу пользователя, несмотря на многообразие его нечетких предпочтений и разные критерии выбора и учета этих предпочтений. Иными словами, продолжает оставаться актуальной задача четкой формулировки запроса, многокритериального выбора предпочтений пользователей при реализации релевантного информационного поиска на ресурсах ИКС.

Выходом из этой непростой ситуации, методологическим, математическим и практическим инструментом, который, по нашему мнению, может и должен помочь в решении задачи многокритериального выбора предпочтений пользователей при реализации релевантного информационного поиска на ресурсах ИКС, являются экспертные технологии, в частности, тех-

нологии проактивного (упреждающего, прогностического) либо текущего формирования, обработки и применения явных и неявных экспертных знаний [8-14].

Строго говоря, явные экспертные знания представляют собой либо уже формализованную информацию, которой обладает эксперт, либо информацию, которую легко формализовать – сформулировать, записать и свободно (нетрудно) передать другим людям (или механизмам) в виде инструкций, документов, текстов, формул, регламентов, баз данных и т.п. Скрытые, неявные экспертные знания являют собой личный опыт, интуицию, навыки, ментальные модели, привычки и иные грани мастерства эксперта, которые невозможно формализовать. Коренное отличие явных экспертных знаний от неявных – в их способности к отчуждению: явные знания могут существовать и существуют отдельно от эксперта (носителя этих знаний), а неявные знания неотделимы от его личности [12].

С точки зрения детального рассмотрения возможности и практического построения модели и механизмов многокритериального выбора и учета поисковых предпочтений на основе явных и неявных экспертных знаний, необходимо отметить, что задача оценивания этих предпочтений методом экспертного оценивания, может быть решена, если под условными факторами понимать показатели «веса», приоритетности конкретного предпочтения, а под результатами эксперимента – оценки эксперта. Требованием, обязательным правилом и непреложным условием применения этой экспертной модели многокритериального выбора поисковых приоритетов пользователей является оценивание показателей «веса», приоритетности их предпочтений в рамках симметричной, относительно среднего значения, шкалы [13].

Подобная шкала, рассматриваемая с позиции математики нечетких множеств в сочетании с обработкой экспертных знаний, представляет собой вектор лингвистических (словесных либо символьных) терм для формального описания показателей «веса», приоритетности поисковых предпочтений $\vec{W}_{\text{пп}}(\Delta\tau)$, исследуемых и применяемых на временном интервале реализации конкретного поискового запроса ($\Delta\tau$), например:

$$\begin{aligned} \vec{W}_{\text{пп}}(\Delta\tau) = \{ & \text{Низкий вес}(w_1(\Delta\tau)), \text{ Вес ниже среднего}(w_2(\Delta\tau)), \\ & \text{Средний вес}(w_3(\Delta\tau)), \text{ Вес выше среднего}(w_4(\Delta\tau)), \text{ Высокий вес} \\ & (w_5(\Delta\tau))\} = = \\ \{HB, BHC, CB, BBC, BB\} = \{ & w_1(\Delta\tau), w_2(\Delta\tau), w_3(\Delta\tau), w_4(\Delta\tau), w_5(\Delta\tau)\}, (1) \end{aligned}$$

где среднее значение $w_3(\Delta\tau)$, или, в форме лингвистической переменной – $\{CB\}$, соответствует «нулевому» уровню показателя «веса», приоритетности конкретного предпочтения [13].

Принимая во внимание нечеткость, «размытость» границ между пятью этими соседними лингвистическими (словесными либо символьными) оценками «веса», приоритетности конкретного предпочтения пользователей, для описания таких оценок используются функции принадлежности нечетких множеств

$$\mu_{w_i}(\Delta\tau) \in [0, 1], \quad i = 1..5, \quad (2)$$

где $\mu_{w_i}(\Delta\tau)$ – математическая функция, определяющая степень соответствия элемента (в нашем случае $w_i(\Delta\tau)$) из универсального множества $\{\vec{W}_{пп}(\Delta\tau)\}$ некоторому нечеткому множеству максимально «весомых», наиболее значимых предпочтений $\{\vec{W}_{пп}(\Delta\tau)\}$ в рамках реализации этого поискового запроса на временном интервале $(\Delta\tau)$ [15].

Именно через эти функции учитываются мнения экспертов, здесь определяются «веса», приоритетность конкретного предпочтения, опираясь на явные и неявные экспертные знания, на их формализуемые и неформализованные знания, опыт и интуицию. Число классов «весов», приоритетности конкретного предпочтения пользователей в нашей шкале равно пяти. Область определения функции принадлежности – интервал на шкале уровня показателя «веса», приоритетности конкретного предпочтения пользователей. Срединная точка $w_3(\Delta\tau)$, или, в форме лингвистической переменной – $\{CB\}$, интервала промежуточной оценки «веса», значимости предпочтения, принимается за границу областей определения функций, принадлежащих соседним оценкам на шкале «весомости».

С учетом этого алгоритм, позволяющий реализовать многокритериальный выбор предпочтений пользователей на основе явных и неявных экспертных знаний для реализации релевантного информационного поиска на ресурсах ИКС, по нашему мнению, может и должен состоять из следующих этапов (стадий, шагов) [13].

Этап 1. Формирование шкалы качественных оценок «весов», приоритетности поисковых предпочтений с заменой лингвистических (словесных либо символьных) оценок $\{HB\}$ либо $w_1(\Delta\tau)$ и $\{VB\}$ либо $w_5(\Delta\tau)$ соответственно на -1 и $+1$.

Этап 2. Построение ортогонального (на основе учета явных и неявных экспертных знаний через функции принадлежности) плана опроса экспертов и осуществление такого экспертного опроса.

Этап 3. Определение показателей максимально «весомых», наиболее приоритетных, значимых предпочтений в рамках реализации конкретного поискового запроса и применение этих предпочтений в механизмах информационного поиска для получения по-настоящему релевантных результатов реализации поисковых запросов пользователей на ресурсах современных инфокоммуникационных систем.

Таким образом, рассмотрены некоторые особенности, этапы и условия использования явных и неявных экспертных знаний в сочетании с методами теории нечетких множеств, как математического и методологического инструмента для обоснованного многокритериального выбора и последующего учета предпочтений пользователей при практической реализации релевантного информационного поиска на ресурсах современных инфокоммуникационных систем.

Предложенный подход использует явные и неявные знания экспертов для формулировки и описания лингвистических терм в интересах формального описания и корректного математического расчета показателей «веса», приоритетности поисковых предпочтений пользователей. Использование данного подхода, на наш взгляд, позволит повысить не только релевантность, но и оперативность и пертинентность информационного поиска.

Список используемых источников

1. Лукичев А. Е. Виртуализация нового типа // Программно-определяемые ЦОД – борьба за будущее / Jet Info информационный бюллетень. №11 (256), 2014. С. 26–30.
2. Сенько А. В. Работа с BigData в облаках. Обработка и хранение данных с примерами из Microsoft Azure. СПб.: Питер, 2019. 448 с.
3. Паращук И. Б., Михайличенко Н. В. Особенности построения и анализа качества дата-центров как базовых элементов ИТ-инфраструктуры // Перспективные направления развития отечественных информационных технологий: материалы IV межрегиональной научно-практической конференции. Севастополь, 18-22 сентября 2018 г. / Севастопольский государственный университет, науч. ред. Б. В. Соколов. Севастополь: СевГУ, 2018. С. 28–29.
4. Защита программно-определяемых ЦОД. Как это делать правильно. М.: АО «Лаборатория Касперского». 2017. 12 с.
5. Авраменко В. С., Маликов А. В. Методика диагностирования компьютерных инцидентов безопасности в автоматизированных системах специального назначения // Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли. 2020. Т.12, № 1. С. 44–52.
6. Миронов А. Л., Позднышева Г. В. Соотношение релевантности и пертинентности поисковой выдачи // Актуальные проблемы агроинженерии в XXI веке: материалы Национальной научно-практической конференции с международным участием (п. Майский, 01.12.2022 г.). ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ, 2023. С. 257–260.

7. Саяркин Л. А., Селезнев А. В., Парашук И. Б. Анализ условий реализации и содержание функциональных стадий методики оперативного и релевантного информационного поиска в интересах должностных лиц ремонтных органов и специалистов подразделений технического обслуживания войск связи // X Межвузовская научно-практическая конференция «Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях». Труды конференции: Сборник материалов. СПб.: ВАС, 2025. С. 227–232.
8. Полани М. Личностное знание / Пер. с англ. М.Б. Гнедовского, Н. М. Смирновой, Б. А. Старостина. М.: «Прогресс», 1985. 344 с.
9. Шинкарев С. А., Парашук И. Б., Михайличенко А. В. Проактивный экспертный контроль структурной надежности сетей передачи данных и мобильных дата-центров для сбора и хранения электронных ресурсов в интересах инженерного образования // Совершенствование подготовки специалистов инженерных специальностей в контексте инновационного развития России. Проблемы и решения: материалы Международной заочной научно-практической и научно-методической конференции (15 ноября 2022 г.). Сборник докладов и статей // Под общей ред. Бабошина В. А. СПб, Петергоф: ВИ (ЖДВ и ВОСО), 2023. С. 507–514.
10. Цветков В. Я. Неявное знание и его разновидности // Вестник Мордовского университета. №3, 2014. С. 199–205.
11. Корниенко А. А. Экспертное знание в обществе порожденного риска: концептуальный аспект // Вестник Томского государственного университета. Философия. Социология. Психология. 2018. № 43. С. 69–79.
12. Гапоненко А. Л., Чернявский И. Ф., Швырков Ю. А. Явные и неявные знания в современном менеджменте // Государственная служба, 2015, №6 (98). С. 87–90.
13. Микони С. В., Соколов Б. В., Юсупов Р. М. Квалиметрия моделей и полимодельных комплексов: монография. М.: РАН, 2018. 314 с.
14. Collins H. Tacit and Explicit Knowledge. Chicago: University of Chicago Press. 2010. 200 p.
15. Парашук И. Б., Бобрик И. П. Нечеткие множества в задачах анализа сетей связи. СПб.: ВУС, 2001. 80 с.

MULTI-CRITERIA SELECTION OF USER PREFERENCES BASED ON EXPLICIT AND IMPLICIT EXPERT KNOWLEDGE FOR THE IMPLEMENTATION OF RELEVANT INFORMATION RETRIEVAL ON THE RESOURCES OF INFORMATION AND COMMUNICATION SYSTEMS

Parashchuk I., Sayarkin L., Tsypnyatov V.

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

This article examines some of the features, stages, and conditions of using explicit and implicit expert knowledge in combination with fuzzy set theory methods as a mathematical and methodological tool for informed multi-criteria selection and subsequent consideration of user preferences in the practical implementation of relevant information retrieval on the resources of modern information and communication systems. The proposed approach utilizes explicit and implicit expert knowledge to formulate and describe linguistic variables for the formal description and correct mathematical calculation of the «weight» and priority indicators of user search preferences. We believe that this approach will improve not only the relevance but also the efficiency and pertinence of information retrieval.

Key words: information and communication system, expert, explicit and implicit knowledge, membership function, information retrieval, user preferences, relevance, resource

УДК 621.391.8
ГРНТИ 3.49.25

ТОЧНЫЕ АНАЛИТИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ РАСЧЕТА ВЕРОЯТНОСТИ ОШИБКИ МНОГОПОЗИЦИОННЫХ СИГНАЛОВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МЕТОДА ОБНУЛЕНИЯ В КАНАЛАХ МІМО

А. А. Пелин, Н. В. Савищенко

Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного

В данной статье рассматривается проблема оценки помехоустойчивости линейного алгоритма обнуления ZF (Zero-Forcing) в сетях MIMO (Multiple Input Multiple Output). Предложена методика получения точных аналитических значений вероятностей символьной и битовой ошибки без стохастического численного интегрирования. Использование аппарата специальных интегральных $\mathcal{H}$ -функций позволило вывести замкнутые решения для сигналов ФМ-8 и КАМ-16. Для оценки корректности разработанной методики построена имитационная модель в MATLAB.

беспроводные системы связи, технология MIMO, алгоритм обнуления, пространственное разнесение, точные аналитические значения, помехоустойчивость, специальные интегральные функции

Введение

Фундаментальной задачей развития перспективных систем беспроводной связи (5G-Advanced, 6G) выступает достижение высокой пропускной способности при строгом удержании вероятности битовой ошибки P_b на целевом минимуме [1]. Физическое преодоление ограничений частотного ресурса безальтернативно опирается на системы пространственного мультиплексирования MIMO. Теоретические основы многоантенных архитектур и законы изменения их пропускной способности в условиях многолучевых сред заложены в классических исследованиях [2] и детально формализованы в базовой теории беспроводной связи [3].

Однако увеличение пропускной способности канала связи ценой перехода к многоэлементным матрицам усложняет радиотехническую задачу пространственного разделения информационных потоков на стороне приемника. Нелинейные алгоритмы на основе максимального правдоподобия гарантируют оптимальную демодуляцию, но относятся к классу NP-трудных вычислительных задач. Это существенно затрудняет их интегра-

цию в энергосберегающие мобильные тракты. Альтернативное применение энергоэффективных линейных детекторов, например, алгоритма обнуления, требует существенно меньшего числа вычислительных тактов. Тем не менее, в реальных многолучевых средах данный метод обнажает серьезное алгоритмическое ограничение: псевдоинвертирование плохо обусловленной вырожденной матрицы радиоканала в приемнике неизбежно провоцирует эффект многократного усиления мощности аддитивного гауссовского шума (АБГШ) [4]. В связи с этим острая необходимость в адекватном исследовании подобных систем выходит на первый план.

При решении задач оценки качества радиоприема инженерами рассматриваются два независимых подхода. Использование ресурсоемких симуляторов на базе алгоритма Монте-Карло дает практическую гибкость, но имеет критические вычислительные лимиты: определение энергетики систем при экстремально низких ошибках требует долгих часов серверных испытаний. Второй путь опирается на строгий математический синтез. Долгое время в данном классе преобладали решения на базе грубых асимптотических аппроксимаций (таких как границы Чернова), которые могут искажать данные о поведении детекторов обнуления ММО в областях замираний и низких отношениях сигнал/шум.

Целью статьи является проведение аналитического расчета помехоустойчивости приема многопозиционных цифровых сигналов алгоритмом обнуления в системах ММО с использованием математического аппарата специальных интегральных $\mathcal{H}$ -функций [5, 6]. Это должно обеспечить возможность аналитического расчета символьной (P_e) или битовой (P_b) ошибок, справедливых во всем диапазоне отношений сигнал/шум $\gamma_b = E_b/N_0$, где E_b – средняя (E_{bc}) или максимальная (E_{bm}) энергия, затрачиваемая на передачу одного бита, N_0 – спектральная плотность мощности шума. Традиционно в теории связи оценка помехоустойчивости осуществляется по двум альтернативным направлениям: путем имитационного (статистического) моделирования методом Монте-Карло либо с использованием аналитических формул. Имитационное моделирование обладает высокой гибкостью: оно позволяет формировать различные сложные модели радиоканалов и тестировать их без необходимости изменения расчетных формул. Однако этот метод имеет жесткие вычислительные ограничения и не позволяет исследовать весь спектр отношений γ_b . В области высоких значений γ_b машинного времени может не хватить для накопления достаточной статистики ошибок, вследствие чего исследователь рискует не заметить так называемые

мую «неустранимую ошибку» (которая возникает, например, в каналах с фазовой нестабильностью) [5].

Альтернативный подход на основе строгих аналитических выражений лишен указанного недостатка и обеспечивает абсолютную точность во всем диапазоне отношений γ_b , позволяя оценивать сверхнизкие вероятности (порядка 10^{-9} и ниже). Однако применение этого метода имеет существенный барьер: для синтеза вероятности ошибки приемника обнуления в системе MIMO жестко требуется наличие математически замкнутого исходного аналитического выражения для применяемой многопозиционной модуляции в базовом (скалярном) канале связи SISO (Single-Input Single-Output) с АБГШ. Отсутствие исходной SISO-базы блокирует дальнейший аналитический расчет. Таким образом, адаптация аппарата специальных $\mathcal{H}$ -функций, способного опереться на классические формулы каналов SISO и преобразовать их в аналитические выражения для систем MIMO ZF без громоздкого имитационного расчета случайных матриц, представляет собой актуальную научную задачу. Это обеспечит инженеров точным инструментом расчета требуемой степени пространственного разнесения.

Пространственное мультиплексирование и матрица Уишарта

В классических системах SISO предельная информационная емкость ограничивается логарифмической зависимостью. Преодоление этого предела в архитектурах MIMO, согласно положениям Фошини [2], осуществляется через распараллеливание сигналов в независимых физических подканалах. В дискретном представлении многоантенный канал радиосвязи с аддитивным белым гауссовым шумом задается матричной записью: $\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{s} + \mathbf{n}$, где $\mathbf{y}$ и $\mathbf{s}$ комплексные векторы принятых и переданных сигналов соответственно; L_t – количество передающих антенн; L_r – количество приемных антенн; $\mathbf{H} \in \mathbb{C}^{L_r \times L_t}$ – комплексная матрица замираний (коэффициентов передачи радиоканала); вектор $\mathbf{n}$ представляет собой вектор отсчетов АБГШ который имеет нулевое математическое ожидание и ковариационную матрицу $\mathbf{R}_n = \mathbb{E}[\mathbf{n}\mathbf{n}^H] = N_0\mathbf{E}_{L_r} = 2\sigma_n^2\mathbf{E}_{L_r}$, где $\mathbf{E}_{L_r}$ – единичная матрица, а σ_n^2 – дисперсия шума. Разделение независимых потоков в детекторе ZF основывается на инвертировании квадратной матрицы Грамма $\mathbf{W} = \mathbf{H}^H\mathbf{H}$. Эквивалентная помехоустойчивость k -го выделенного потока обратно пропорциональна диагональному элементу $[\mathbf{W}^{-1}]_{kk}$. Известно, что элементы вырожденных случайных матриц в многоантенных коррелированных каналах подчиняются центральному распределению Уишарта $\mathbf{W} \sim \mathcal{CW}_{L_t}(L_r, \mathbf{\Sigma})$ [6].

Пропускная способность приемника ZF в условиях замираний вычисляется через математическое ожидание: $E[C_{ZF}] = \sum_{k=1}^{L_t} E_w [\log_2(1 + \gamma_s/[W^{-1}]_{kk})]$.

Данное нелинейное выражение формализует эффект «усиления шума». Компенсация потерь достигается интеграцией избыточных приемных элементов ($L_r > L_t$), увеличивающих число степеней свободы. В рамках данной статьи влияние пространственного разнесения на помехоустойчивость определяется через специальную интегральную $\mathcal{H}$ -функцию.

Влияние пространственной корреляции замираний

Габаритные ограничения терминальных устройств часто диктуют размещение антенн на расстояниях $\Delta d < \lambda/2$, где Δd – расстояние между элементами антенной решетки (шаг разнесения антенн), λ – длина волны радиосигнала. Разрушение ортогональности путей приводит к взаимной корреляции каналов [4]. При альтернативной модели канала реализация матрицы записывается в форме: $\mathbf{H} = \mathbf{R}_r^{1/2} \mathbf{H}_w \mathbf{R}_t^{1/2}$, где $\mathbf{R}_r$ и $\mathbf{R}_t$ положительно определенные эрмитовы матрицы пространственной корреляции на приемной и передающей сторонах. Данные корреляционные связи физически обуславливают ухудшение характеристик радиотракта и математически уменьшают эффективный ранг независимой матрицы рэлеевских замираний $\mathbf{H}_w$. Для алгоритма ZF матричная корреляция деструктивна: эквивалентная эффективная энергетика потока с учетом потерь в матрицах задается как $\gamma_{0,k} = \gamma_k/[\mathbf{R}_t^{-1}]_{kk}$, $k = 1, \dots, L_t$. Строгий аналитический анализ таких структур включает применение классических гауссовых оценок.

Точные аналитические решения вероятности ошибки для ФМ-М и КАМ-М

Отказ от ресурсоемких численных расчетов вероятности ошибки методами статистического моделирования достигается приведением математического ожидания T -функции Оуэна $T(z, a)$ в замкнутую форму специальной интегральной $\mathcal{H}$ -функции [5]:

$$ET[(\sqrt{2g\gamma_k}, \eta)] = \mathcal{H}_{L_r-L_t+1} \left(0; \sqrt{\frac{g\gamma_{0,k}}{g\gamma_{0,k}+1}}, \eta \right), \quad (1)$$

где $\gamma_{0,k} = \gamma_k/[\mathbf{R}_t^{-1}]_{kk}$, $k = 1 \dots L_t$ и $\mathbf{R}_t$ – матрица пространственной корреляции на передающей стороне. Интегральное представление данной специальной функции определено как:

$$\mathcal{H}_\nu(z; a, b) = \frac{(1-a^2)^\nu}{2\pi} \int_0^b \frac{1}{(1+x^2)(1+a^2x^2)^\nu} \exp\left(-\frac{z^2}{2} \frac{1+x^2}{1+a^2x^2}\right) dx, \quad (2)$$

где $\nu \geq 0$, $0 \leq a^2 \leq 1$. Параметр $\nu = L_r - L_t + 1 \equiv L_{div}$ задает порядок пространственного разнесения. В частном случае, когда определяется математическое ожидание от функции Гаусса, то

$$\mathcal{H}_n(0, b, \infty) = \frac{1}{2} \left(\frac{1-b}{2}\right)^n \sum_{k=0}^{n-1} \binom{n+k-1}{k} \left(\frac{1+b}{2}\right)^k. \quad (3)$$

Вероятность ошибки для ФМ-М (М-PSK)

Средняя битовая вероятность ошибки для ФМ-М при алгоритме приема ZF определяется как:

$$\begin{aligned} \tilde{P}_{b, \text{ФМ-М}}(\gamma_{bc}; L_t, L_r) &= \frac{1}{K} \sum_{j=1}^{M/4} \left[\omega_j \mathcal{H}_\nu\left(0, b_j, \cot \frac{(2j-1)\pi}{M}\right) + \frac{8}{M} \mathcal{H}_\nu(0, b_j, \infty) \right], \quad (4) \\ b_j &= \sqrt{\frac{g_j^{PSK} g_{0,k}}{g_j^{PSK} g_{0,k} + 1}}, \\ g_j^{PSK} &= K \sin^2 \frac{(2j-1)\pi}{M}, j = 1, \dots, \frac{M}{4}. \end{aligned}$$

где $\omega_j = 8/M \sum_{i=1}^{K-2} (-1)^{\lfloor (j-1)2^{i+1}/M \rfloor} 2^i$. В частности, для ФМ-8 $\omega_1 = 2$ и $\omega_2 = 2$.

Вероятность ошибки для КАМ-16 (16-QAM)

Средняя битовая вероятность ошибки для многопозиционных сигналов КАМ-М в детерминированными параметрами и АБГШ при когерентном приеме определяется как:

$$P_{b, \text{КАМ-М}}(\gamma_{bc}) = \frac{1}{\log_2 M} \sum_{j=1}^{\sqrt{M}-1} a_{2j-1} Q\left(\sqrt{\frac{3(2j-1)^2 \log M}{M-1}} \gamma_{bc}\right), \quad (5)$$

где коэффициенты $a_{\{2j-1\}}, j = 1, \dots, \sqrt{M}$, определены в [5]. В частности, для КАМ-16 средняя битовая вероятность равна:

$$\tilde{P}_{b, \text{КАМ-16}}(\gamma_{bc}) = \frac{1}{4} \{3Q(\sqrt{4\gamma_{bc}/5}) + 2Q(\sqrt{36\gamma_{bc}/5}) - Q(\sqrt{20\gamma_{bc}/5})\}, \quad (6)$$

Для расчета ошибки в k -й ветви приемника ZF при наличии пространственной корреляции каналов, интегрирование Q -функции аналитически заменяется на ее точное значение $2\mathcal{H}_\nu(0, b, \infty)$. Следовательно, обобщенное выражение для средней вероятности битовой ошибки многопозиционных

сигналов КАМ-М в условиях замираний представляется в виде конечной суммы:

$$\tilde{P}_{b, \text{КАМ-М}}(\gamma_{bc}) = \frac{2}{\log_2 M} \sum_{j=1}^{\sqrt{M}-1} a_{2j-1} \mathcal{H}_v \left(0, \sqrt{\frac{g_{2j-1}^{QAM} \gamma_{bc}}{g_{2j-1}^{QAM} \gamma_{bc} + [\mathbf{R}_t^{-1}]}} \right), \quad (7)$$

Таким образом, используя (5), получаем, что при алгоритме приема ZF средняя битовая вероятность ошибки, после несложных преобразований, определяется, как:

$$\tilde{P}_{b, \text{КАМ-16}}(\gamma_{0,k}) = 1/2[3\mathcal{H}_v(0, b_1, \infty) + 2\mathcal{H}_v(0, b_2, \infty) - \mathcal{H}_v(0, b_3, \infty)], \quad (8)$$

где $b_1 = \sqrt{(2\gamma_{0,k}/5)/(1 + 2\gamma_{0,k}/5)}$; $b_3 = \sqrt{(10g_{0,k}/5)/(1 + 10g_{0,k}/5)}$; $b_2 = \sqrt{(18\gamma_{0,k}/5)/(1 + 18\gamma_{0,k}/5)}$.

Для проведения дальнейшего графического анализа и проверки модели в настоящей статье ограничимся случаем отсутствия взаимной корреляции пространственных ветвей. В таком сценарии диагональные элементы обратной корреляционной матрицы равны единице: $[\mathbf{R}_t^{-1}]_{kk} = 1$ для всех $k = 1, \dots, L_t$, и, следовательно, принимается условие $\gamma_{0,k} = \gamma_{bc}$ для всех $k = 1, \dots, L_t$.

Для проверки достоверности разработанных аналитических выражений создана имитационная модель тракта приема-передачи ММО в среде MATLAB. В качестве источника данных в модели применяется псевдослучайная последовательность независимых равновероятных двоичных символов $p(0) = p(1) = 0.5$. Отображение бит в комплексные символы (ФМ-8, КАМ-16) выполняется с использованием кода Грея. Канал связи моделируется с учетом квазистатических рэлеевских замираний. Элементы комплексной матрицы канала $\mathbf{H}$ формируются как независимые случайные величины с нормальным законом распределения $\mathcal{CN}(0,1)$. Значения коэффициентов передачи $\mathbf{H}$ остаются неизменными на интервале передачи одного информационного блока длиной $N_{sym} = 50$ символов, после чего формируются заново. Подобная частота обновления среды обеспечивает корректное усреднение результатов по множеству случайных реализаций ковариационных матриц канала. К принимаемому сигналу добавляются отсчеты аддитивного белого гауссовского шума. Дисперсия АБГШ нормируется в соответствии с энергетической информационной емкостью символов γ_{bc} . При оценке помехоустойчивости методом Монте-Карло применен адаптивный алгоритм остановки испытаний на основе доверительного интервала. Отно-

сительная статистическая погрешность ϵ вычисляется по формуле $\epsilon \approx 1/\sqrt{N_{err}}$, где N_{err} – количество зарегистрированных ошибочно принятых бит. В имитационной модели цикл передачи для заданного отношения γ_{bc} прекращается при достижении порога $N_{err} \geq 1500$. Это условие жестко фиксирует предельную относительную погрешность измерений на уровне не хуже $\epsilon \leq 2,5\%$. Дополнительно в модель введено требование об усреднении статистики не менее чем по 3000 независимым реализациям матриц $\mathbf{H}$, что гарантирует выполнение свойства эргодичности и стабильность получаемых экспериментальных кривых на графике.

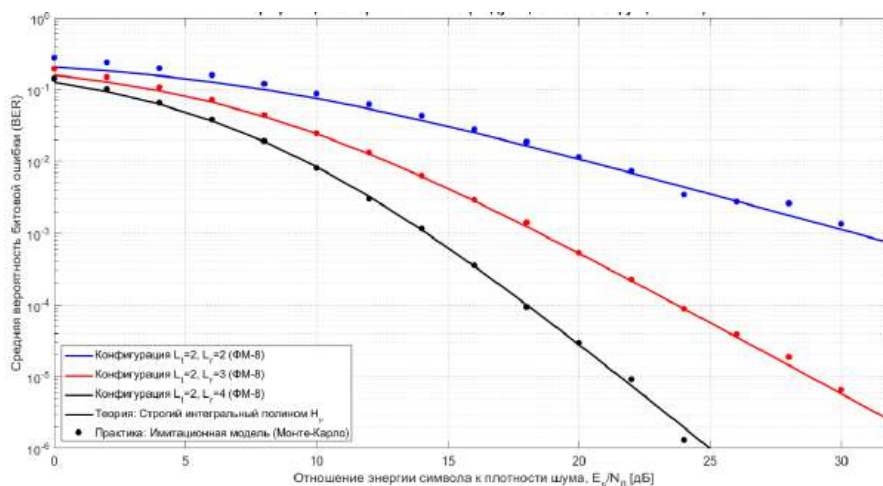


Рис. 1. Сравнение аналитической $\mathcal{H}$ -модели и имитационного моделирования (методом Монте-Карло) метода обнуления для сигналов ФМ-8

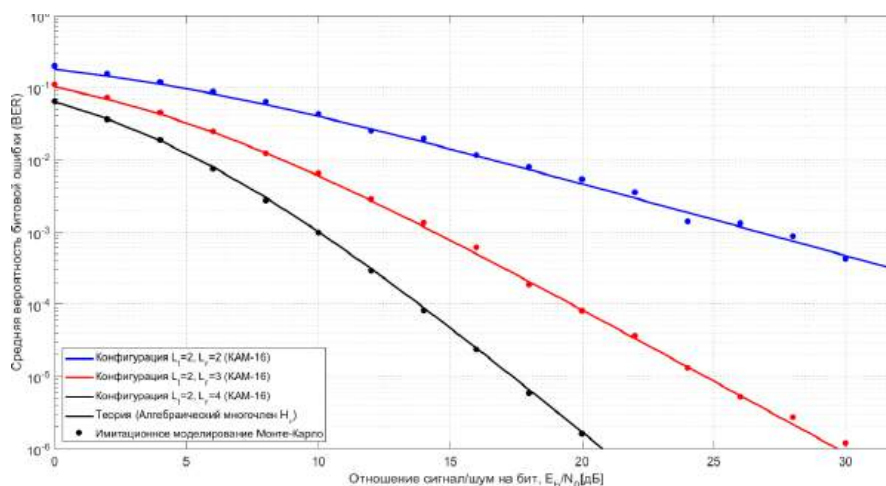


Рис. 2. Сравнение аналитической $\mathcal{H}$ -модели и имитационного моделирования (методом Монте-Карло) метода обнуления для сигналов КАМ-16

Анализ графических результатов

На рис. 1, 2 приведены зависимости средней вероятности битовой ошибки P_b от отношения γ_{bc} на бит для сигналов ФМ-8 и КАМ-16. Сплошными линиями представлены результаты точного аналитического расчета с использованием $\mathcal{H}$ -функций; маркерами обозначены результаты имитационного моделирования. Высокая степень совпадения расчетных и экспериментальных данных во всем исследуемом диапазоне γ_{bc} подтверждает адекватность разработанной математической модели и допустимость применения разработанной методики вычисления вероятности ошибки согласно (1) при применении в ММО алгоритма приема ZF. Анализ графиков показывает, что симметричная антенная конфигурация без пространственного избытка ($L_t = 2, L_r = 2$) имеющая минимальный порядок разнесения ($L_{div} = 1$), характеризуется низкой помехоустойчивостью в многолучевой среде. Псевдоинвертирование плохо обусловленных матриц канала при обнулении вызывает существенное увеличение дисперсии АБГШ на выходе детектора. Вследствие этого спад кривых P_b носит пологий характер. Применение симметричной системы ММО ZF для сигнальной конструкции модуляции КАМ-16 требует недопустимо высоких энергетических затрат для достижения пороговых значений достоверности связи ($P_b \leq 10^{-4}$). Эффективным способом компенсации указанного явления служит пространственное разнесение путем введения избыточных приемных антенн ($L_r > L_t$). Графические результаты (кривые $L_{div} = 2$ и $L_{div} = 3$) иллюстрируют перераспределение корней обратной ковариационной матрицы, что ограничивает усиление аддитивной помехи. Рост параметра разнесения L_{div} переводит характеристику P_b в зону асимптотически резкого убывания вероятности ошибки, снижая требования к энергетическому бюджету γ_{bc} на 20...25 дБ.

Заключение

Проведенный комплексный синтез доказал, что применение предложенного аналитического метода ($\mathcal{H}$ -функций), позволяет разработчикам ММО систем прогнозировать поведение и аппаратный облик радиосистем (с любой степенью разнесения L_{div}). Метод ZF, оставаясь энергоэффективным и NP -простым в вычислительной сложности, полностью окупает себя в архитектурах массивированного избыточного приема [7].

Список используемых источников

- 1/ Larsson E. G., Edfors O., Tufvesson F., Marzetta T. L. Massive MIMO for next generation wireless systems // IEEE Communications Magazine, 2014. Vol. 52. N 2. P. 186–195.
2. Foschini G. J., Gans M. J. On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas // Wireless Personal Communications, 1998. Vol. 6. N 3. PP. 311–335.
3. Tse D., Viswanath P. Fundamentals of Wireless Communication. – Cambridge University Press, 2005. 378 p.
4. Gore D., Heath R. W., Paulraj A. On performance of the zero forcing receiver in presence of transmit correlation // Proc. IEEE Int. Symp. Information Theory. Lausanne, Switzerland, 2002. PP. 159–165.
5. Савищенко Н. В. Специальные интегральные функции, применяемые в теории связи: Монография. СПб.: ВАС, 2012. 560 с.
6. Савищенко Н. В., Пелин А. А. Распределение Уишарта для анализа помехоустойчивости приема многоантенных систем беспроводной связи // Актуальные проблемы прикладной мат., информ. и механики: материалы Междунар. конф. Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2025. С. 832–838.
7. Montiouis W., Imoize A. L. Massive MIMO for future wireless communication systems: technology and applications. Wiley, 2025. 138 p.

**EXACT ANALYTICAL SOLUTIONS FOR CALCULATING THE ERROR
PROBABILITY OF M-ARY SIGNALS USING THE ZERO-FORCING METHOD
IN MIMO CHANNELS****Pelin A., Savischenko N.**

Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union
S. M. Budyonny

This paper addresses the problem of evaluating the error performance of the linear Zero-Forcing (ZF) algorithm in MIMO (Multiple Input Multiple Output) networks. A methodology is proposed for obtaining exact analytical values of symbol and bit error probabilities without utilizing stochastic numerical integration. The application of the mathematical framework of special integral $\mathcal{H}$ -functions enabled the derivation of closed-form solutions for 8-PSK and 16-QAM signals. To verify the validity of the developed methodology, a simulation model was constructed in MATLAB.

Key words: wireless communication systems, MIMO technology, zero-forcing algorithm, spatial diversity, exact analytical values, error performance, special integral functions

УДК 535.643
ГРНТИ 29.31.29

ВЛИЯНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ СВЕТОДИОДОВ НА ЗАДАНИЕ КОРРЕЛИРОВАННОЙ ЦВЕТОВОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ В ХУДОЖЕСТВЕННОМ ОСВЕЩЕНИИ

С. В. Перелыгин, С. Д. Чижиков, О. С. Шитова

Санкт-Петербургский государственный институт кино и телевидения

В данной статье приведены результаты работы по расчету устанавливаемой на светодиодном осветительном приборе интенсивности излучения (приборной интенсивности) для получения заданной коррелированной цветовой температуры. Представлены аналитические выражения, связывающие излучение RGB-светодиодов с приборной интенсивностью. Выполнена проверка полученных результатов по ГОСТ 54350-2015.

коррелированная цветовая температура, спектроколориметр, светодиоды

Данная статья затрагивает тему художественного освещения при съемке кинофильмов и телеспектаклей.

В ходе съемочного процесса режиссер и оператор требуют установить на осветительных приборах конкретное значение коррелированной цветовой температуры [1]. Однако не всегда у осветительных приборов есть внутренняя градуировка, т.е. заранее заданные предустановки (пресеты). Соответственно, художнику по свету часто приходится угадывать КЦТ «на глаз».

Как известно, у светодиодных осветительных приборов всегда есть хотя бы 3 основных цвета светодиодов: красный, зеленый и синий. Смешивая их в определенных пропорциях, художник по свету создает необходимый цвет. Однако целью данной статьи является устранение субъективизма. Человеческий глаз – ненадежный прибор [2], а КЦТ – объективна.

Каким образом достичь требуемого соотношения основных цветов?

Для этого потребуется специальный прибор – спектроколориметр [3]. В рамках работы над данной статьей использовался спектрорадиометр «ТКА-Спектр» [4].

Ранее авторами было проведено исследование взаимодействия диодных осветительных приборов и человеческого глаза. Была разработана математическая модель (1), ставящая в соотношение цветовые координаты цветовой температуры (по Планку) x_T , y_T , цветовые координаты светодиодов основных цветов x_R , x_G , x_B , y_R , y_G , y_B , Y_R , Y_G , Y_B и коэффициенты приборных интенсивностей излучения светодиодов c_R , c_G , c_B .

$$\left\{ \begin{array}{l} x_T = \frac{\frac{c_R Y_R x_R + c_G Y_G x_G + c_B Y_B x_B}{y_R y_G y_B}}{\frac{c_R Y_R + c_G Y_G + c_B Y_B}{y_R y_G y_B}} \\ y_T = \frac{\frac{c_R Y_R + c_G Y_G + c_B Y_B}{y_R y_G y_B}}{\frac{c_R Y_R + c_G Y_G + c_B Y_B}{y_R y_G y_B}} \\ c_R Y_R + c_G Y_G + c_B Y_B = 1 \end{array} \right. \quad (1)$$

Был проведен ряд опытов, на основании результатов которых (рис. 1) был сделан вывод о неполноценности разработанной математической модели: отклонение измеренных КЦТ от теоретически задаваемых ЦТ превысило 20 %.

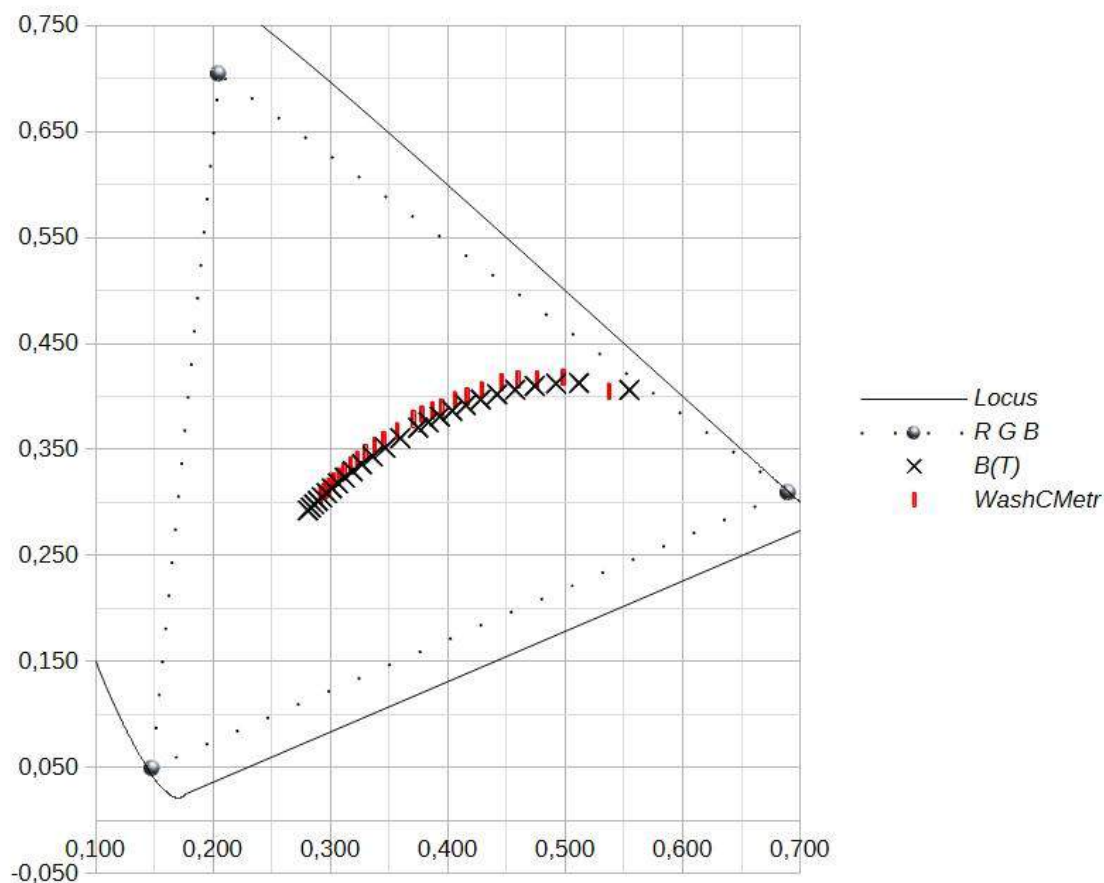


Рис. 1. Участок цветового пространства xu [5] с нанесенными локусом, цветовым пространством осветительного прибора и кривыми ЦТ и КЦТ

В уточненной математической модели помимо нелинейности человеческого глаза должна была учитываться и нелинейность излучения светодиодов. Модель (1) была построена на основании предположения, что зависимость излучения от приборной интенсивности y всех трех светодиодов ли-

нейная с одинаковым тангенсом угла наклона. Однако в результате эксперимента выяснилось, что у всех трех цветов эти коэффициенты наклона разные (рис. 2).

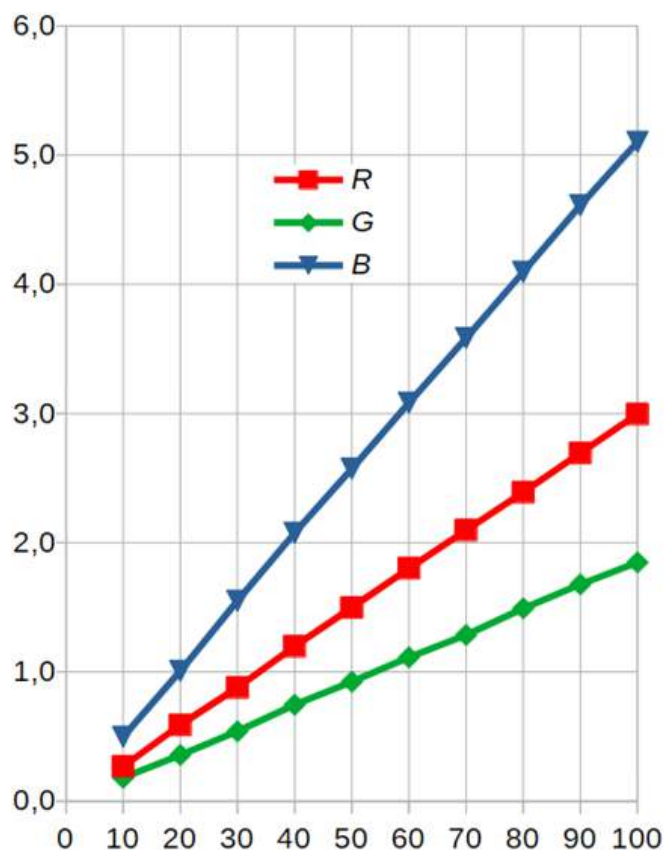


Рис. 2. Зависимость спектральной плотности энергетической освещенности диодов основных цветов от приборной интенсивности излучения
(ось абсцисс – приборная интенсивность излучения, %;
ось ординат – спектральная плотность энергетической освещенности, Вт/м²)

Приведенные на рисунке 2 зависимости были получены при измерении излучения светодиода *Cree® XLamp® MC-E LED* [6] на различных значениях приборной интенсивности. Имея функции зависимости излучения светодиодов от устанавливаемой приборной интенсивности (в процентах), можно их аппроксимировать как линейные функции. Эти функции (2) дополнили имеющуюся математическую модель, и в результате были получены новые значения сочетаний приборных интенсивностей светодиодов для различных КЦТ (рис. 3):

$$\begin{cases} Y_R(I) = 3,0206962384123 \cdot I_R - 0,0200409570466267 \\ Y_G(I) = 1,86723177097688 \cdot I_G - 0,0104211380528434 \\ Y_B(I) = 5,11691627027736 \cdot I_B + 0,00227817192559475 \end{cases}, \quad (2)$$

где $I_{R,G,B} = n_{R,G,B} / 255$, $n_{R,G,B} = 1, 2, 3 \dots 255$.

КЦТ	R, bit	G, bit	B, bit	Визуализация в sRGB	R, %	G, %	B, %	КЦТ
2400	255	188	8		100,00	73,73	3,14	2400
2600	255	206	11		100,00	80,78	4,31	2600
2800	255	223	15		100,00	87,45	5,88	2800
3000	255	239	19		100,00	93,73	7,45	3000
3200	255	254	22		100,00	99,61	8,63	3200
3400	242	255	25		94,90	100,00	9,80	3400
3600	230	255	28		90,20	100,00	10,98	3600
3800	220	255	30		86,27	100,00	11,76	3800
4000	212	255	33		83,14	100,00	12,94	4000
4200	204	255	35		80,00	100,00	13,73	4200
4400	198	255	38		77,65	100,00	14,90	4400
4600	192	255	40		75,29	100,00	15,69	4600
4800	187	255	42		73,33	100,00	16,47	4800
5000	182	255	44		71,37	100,00	17,25	5000
5200	178	255	46		69,80	100,00	18,04	5200
5400	174	255	48		68,24	100,00	18,82	5400
5600	170	255	50		66,67	100,00	19,61	5600
5800	167	255	51		65,49	100,00	20,00	5800
6000	164	255	53		64,31	100,00	20,78	6000
6200	162	255	55		63,53	100,00	21,57	6200
6400	159	255	56		62,35	100,00	21,96	6400
6600	157	255	58		61,57	100,00	22,75	6600
6800	155	255	59		60,78	100,00	23,14	6800
7000	153	255	60		60,00	100,00	23,53	7000
7200	151	255	62		59,22	100,00	24,31	7200
7400	149	255	63		58,43	100,00	24,71	7400
7600	148	255	64		58,04	100,00	25,10	7600
7800	146	255	65		57,25	100,00	25,49	7800
8000	145	255	66		56,86	100,00	25,88	8000

Рис. 3. Сочетания приборных интенсивностей *RGB*-светодиодов для задания КЦТ и визуализация результатов в координатном пространстве экрана [7]

Далее полученные результаты были проверены согласно ГОСТ 54350-2015 [8], в котором приводятся точные цветовые координаты для определенных цветовых температур (рис. 4).

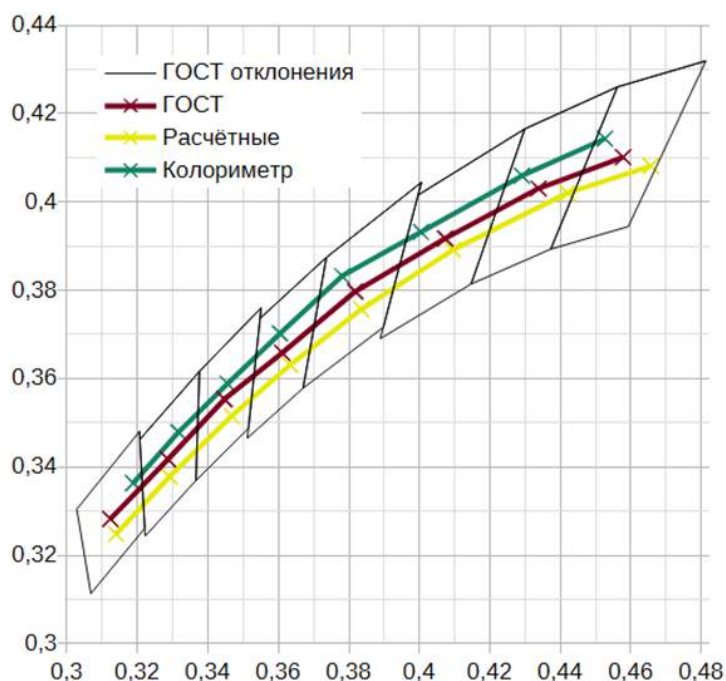


Рис. 4. Участок цветового пространства xy [7] с нанесенными четырехугольниками допустимых отклонений для КЦТ: 2700, 3000, 3500, 4000, 4500, 5000, 5700, 6500 К

Полученная математическая модель исключает субъективный фактор при установке цветовой температуры, что очень важно при работе в сфере киноискусства, где имеет место субъективное восприятие реальности.

В дальнейших разработках следует обратить внимание на создание пользовательского интерфейса, который будет способен помогать осветителям любого уровня подготовки создавать с помощью осветительных приборов цветовую атмосферу произвольного времени суток.

Список используемых источников

1. Мешков В. В., Матвеев А. Б. Основы светотехники: Учебное пособие для вузов в 2-х ч. Физиологическая оптика и колориметрия. 2 изд. Москва: Энергоатомиздат, 1989. 432 с.: ил. ISBN 5-283-00551-8
2. Юстова Е. Н., Сумин Л. М. Современное состояние цветковых измерений. Москва: ВНИИКИ, 1978. 55 с.
3. Гуревич М. М. Фотометрия: Теория, методы и приборы. 2-е изд., перераб. и доп. Ленинград: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1983. 268 с.: ил.
4. Спектрорадиометр «ТКА-Спектр»: электронный ресурс. URL: <https://www.tkaspb.ru/shop/kolorimetriya/spektoradiometr-tka-spektr/>
5. CIE – графики функций глаза: электронный ресурс. URL: <http://cvrl.ioo.ucl.ac.uk/cmfs.htm> (дата обращения: 14.03.2026)
6. Datasheet Cree® XLamp® MC-E LED – RS Online.: электронный ресурс. URL: <https://docs.rs-online.com/a826/0900766b814f49d0.pdf> (дата обращения; 15.03.2026)
7. A Standard Default Color Space for the Internet – sRGB: электронный ресурс. URL: <https://www.w3.org/Graphics/Color/sRGB.html> (дата обращения; 16.03.2026)
8. ГОСТ Р 54350–2015. Приборы осветительные Светотехнические требования и методы испытаний. Москва: Стандартинформ, 2015

THE EFFECT OF LED RADIATION INTENSITY ON SETTING THE CORRELATED COLOR TEMPERATURE IN ARTISTIC LIGHTING

Perelygin S., Chizhikov S., Shetova O.

Saint Petersburg State Institute of Film and Television

This article presents the results of work on calculating the radiation intensity (instrument intensity) set on an LED lighting device to obtain a given correlated color temperature. Analytical expressions are presented that relate the emission of RGB LEDs to the instrument intensity. The results have been verified via using the state standard documentation.

Key words: *correlated color temperature (CCT), spectrocolourimeter, LEDs*

УДК 681.785

ГРНТИ 47.35.41

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНОЙ РЕКОНСТРУКЦИИ РЕФЛЕКТОГРАММЫ В ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ РЕФЛЕКТОМЕТРИИ ВО ВРЕМЕННОЙ ОБЛАСТИ ДЛЯ АВТОНОМНОГО МОНИТОРИНГА ВОЛОКОННЫХ ЛИНИЙ СВЯЗИ

П. С. Петров

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В докладе рассматривается задача вычислительного восстановления рефлектограммы в системах оптической рефлектометрии во временной области (OTDR), предназначенных для автономного мониторинга коротких волоконных линий связи. Актуальность исследования обусловлена ограничениями малоресурсных OTDR-модулей по частоте регистрации, динамическому диапазону и уровню шумов. В качестве исследуемого подхода используется представление рефлектограммы в виде суммы базового профиля обратного рассеяния и остаточной компоненты, содержащей локальные изменения трассы. Для такой модели выполняется сравнение полной и остаточной реконструкции по набору интегральных измерений, полученных при зондировании линии заданными последовательностями. Оцениваются ошибка восстановления, устойчивость к шуму и сохранение диагностически значимых событий.

оптическая рефлектометрия, вычислительная рефлектометрия, волоконная линия связи, коды Уолша–Адамара, вычислительная реконструкция, остаточная реконструкция, рефлектограмма

Введение

Оптическая рефлектометрия во временной области применяется для контроля волоконных линий связи, обнаружения потерь, отражающих неоднородностей и локальных дефектов. В классической схеме короткий импульс вводится в волокно, а приемник регистрирует временную форму обратно рассеянного и отраженного излучения. Вычислительная же рефлектометрия использует серию заранее известных импульсных последовательностей. Приемник измеряет интегральные отклики, а рефлектограмма восстанавливается по известной матрице кодирования. В работах по вычислительной распределенной волоконно-оптической диагностике и вычислительной рефлектометрии показано, что ортогональные последо-

вательности, например такие как Уолша–Адамара, связывают такие отклики с обратным преобразованием [1, 2].

Цель данной работы состоит в создании компьютерной модели вычислительной оптической рефлектометрии на основе кодированных измерений и оценке остаточной реконструкции рефлектограммы при частичном наборе измерений. Для достижения этой цели решаются следующие задачи: построить модель; сформировать кодированные измерения; проверить восстановление рефлектограммы при полном наборе кодов; сравнить полную и остаточную реконструкцию при неполном наборе кодов; оценить качество восстановления.

Модель и данные

Кодированное измерение основано на свойстве ортогональности матрицы Уолша–Адамара. При полном наборе строк выполняется условие $W_N^T W_N = NI$. После нормировки $A = W_N / \sqrt{N}$ измерительная модель имеет вид $y = Ax + n$, где x – рефлектограмма в линейной шкале мощности, y – вектор кодированных измерений, n – шумовая компонента. При полном наборе измерений трасса восстанавливается обратным преобразованием $\hat{x} = A^T y$.

Физическая реализация требует комплементарных последовательностей, так как оптическая мощность *не принимает отрицательных значений*. Каждая строка h с элементами $+1$ и -1 передается двумя последовательностями $h^+ = (h + 1)/2$ и $h^- = (1 - h)/2$. Приемник регистрирует два интегральных отклика D^+ и D^- , после чего формируется подписанное измерение $d = D^+ - D^-$.

В нашей модели шумы, ограничение динамического диапазона и квантование аналого-цифрового преобразователя добавляются к физическим откликам до вычисления разности.

Модель рефлектограммы задает линию с плавным распределенным затуханием и локальными неоднородностями. Искомая трасса рассматривается как $x(z) = b(z) + r(z)$, где $b(z)$ – базовый профиль обратного рассеяния, $r(z)$ – остаточная компонента. Базовый профиль описывает спад уровня сигнала вдоль волокна, а остаточная компонента объединяет локальные потери, отражения и слабые дефекты, как показано на рисунке 1.

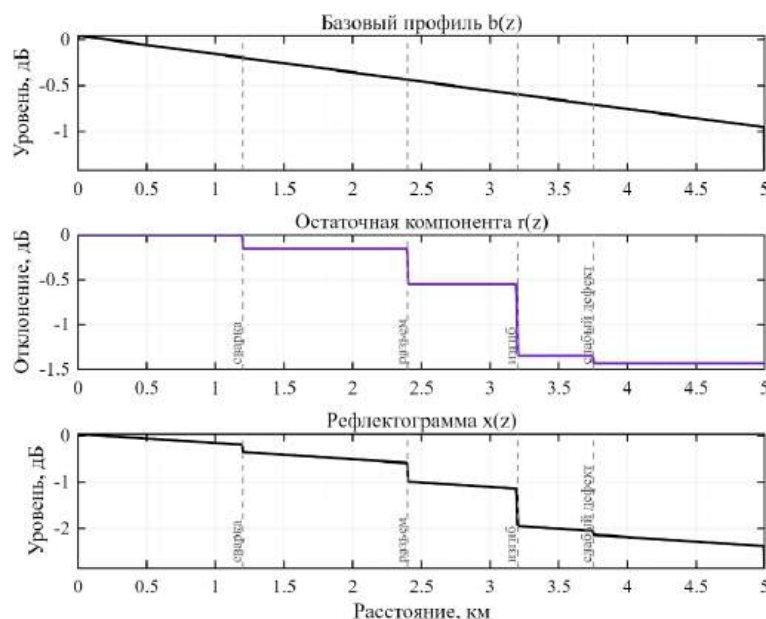


Рис. 1. Модель рефлектограммы

В численной модели линия имеет длину 5 км и содержит $N = 1024$ отсчета. Распределенное затухание принято равным 0,2 дБ/км. Локальные события моделируют сварку, разъем, изгиб и слабое повреждение. Для частичной реконструкции используется $M = 768$ измерений, что соответствует $M/N = 0,75$. Измерительный тракт включает 15-разрядный аналого-цифровой преобразователь, динамический диапазон 55 дБ и усреднение по 32 реализациям.

При $M < N$ задача восстановления становится недоопределенной. Полная реконструкция оценивает весь профиль x по y с тикхоновской регуляризацией. Остаточная реконструкция использует известный базовый профиль: из измерений вычитается вклад $y_r = y - Ab$, затем восстанавливается остаточная компонента и формируется $\hat{x}_{res} = b + \hat{r}$. В текущем моделировании базовый профиль задан точно, поэтому результаты характеризуют предельный случай известного фона.

Качество восстановления оценивается по среднеквадратической ошибке MSE, корню из среднеквадратической ошибки RMSE и отношению сигнал/шум SNR. Эти метрики рассчитываются в линейной шкале мощности и позволяют сравнить методы при одной и той же матрице кодированных измерений.

Результаты

Сначала проверялась реконструкция при полном наборе кодов Уолша–Адамара. Для $N = 1024$ и $M = 1024$ относительная ошибка без шумов составила $1,484 \cdot 10^{-15}$, что соответствует машинной точности. После добавления шумов и квантования аналого-цифрового преобразователя относительная

ошибка увеличилась до $2,317 \cdot 10^{-4}$. Этот режим подтвердил корректность матричной модели и нормировки. Результат приведен на рисунке 2.

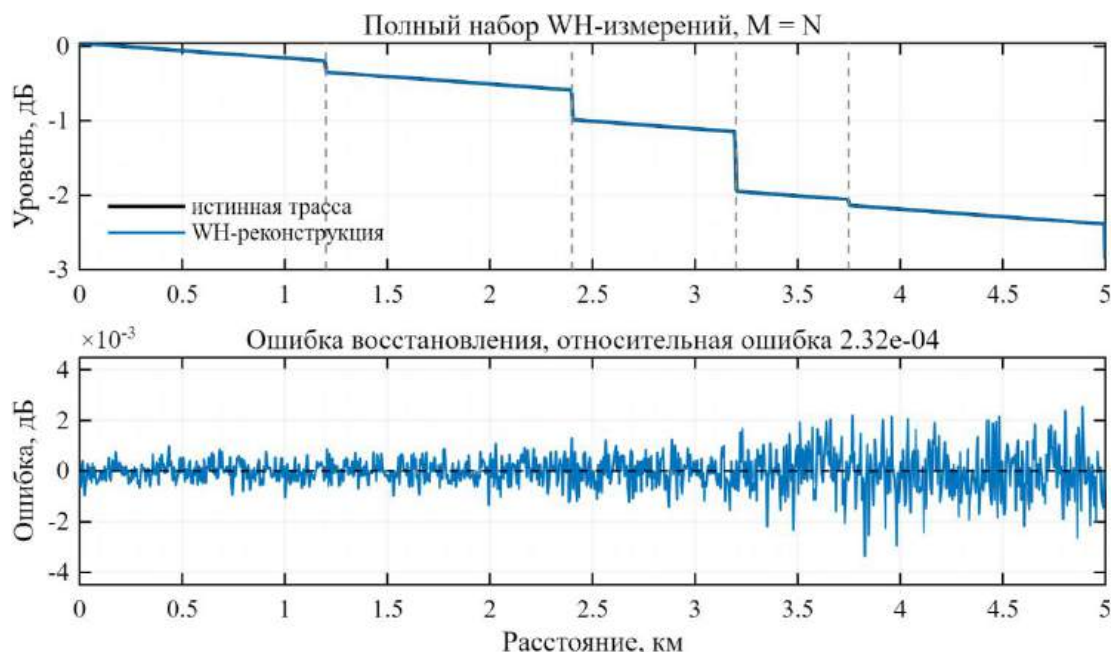


Рис. 2. Восстановление рефлектограммы по полной матрице Уолша-Адамара

Основное сравнение выполнялось при $M/N = 0,75$. Полная реконструкция восстанавливала весь профиль непосредственно по вектору u . Остаточная реконструкция сначала вычитала из измерений вклад Ab , затем оценивала локальную компоненту. Сравнение трасс и ошибок восстановления приведено на рисунке 3.

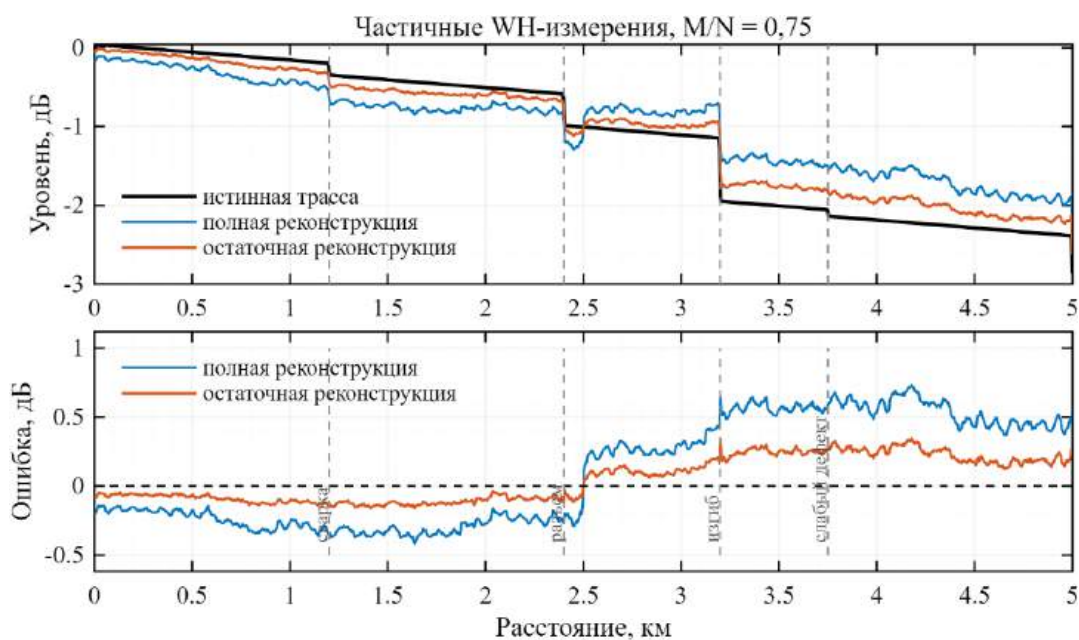


Рис. 3. Сравнение полной и остаточной реконструкции при частичном наборе измерений

Количественные результаты приведены в таблице 1 и на рис. 4. Остаточная постановка уменьшила среднеквадратическую ошибку примерно в 6,3 раза и повысила отношение сигнал/шум почти на 8 дБ по сравнению с полной реконструкцией.

ТАБЛИЦА 1. Метрики реконструкции при $M/N = 0,75$

Метод	MSE	RMSE	SNR, дБ
Прямая регистрация	$1,4735 \cdot 10^{-8}$	$1,2139 \cdot 10^{-4}$	75,036
Полная реконструкция	$9,9390 \cdot 10^{-3}$	$9,9695 \cdot 10^{-2}$	16,746
Остаточная реконструкция	$1,5834 \cdot 10^{-3}$	$3,9792 \cdot 10^{-2}$	24,724

Дополнительно проверялась устойчивость полной и остаточной реконструкции к изменению уровня шума приемника. Во всех расчетах использовалась одна и та же частичная матрица Уолша-Адамара при $M/N = 0,75$, поэтому изменение метрик связано с шумовой нагрузкой измерительного тракта, а не с выбором кодов. При увеличении относительного шума приемника от 0 до $5,0 \cdot 10^{-4}$ форма зависимостей MSE и SNR менялась слабо: обе реконструкции сохраняли почти постоянный уровень ошибки на большей части диапазона. Для полной реконструкции MSE находилась в интервале $9,89 \cdot 10^{-3}$ – $1,05 \cdot 10^{-2}$, а SNR – в интервале 16,52–16,77 дБ. Для остаточной реконструкции MSE составляла $1,56 \cdot 10^{-3}$ – $1,90 \cdot 10^{-3}$, а SNR – 23,94–24,79 дБ. На максимальном уровне шума наблюдалось умеренное ухудшение обеих реконструкций, однако разрыв между ними сохранялся: остаточная постановка обеспечивала выигрыш примерно 5,5–6,3 раза по MSE и 7,4–8,0 дБ по SNR. Такой результат показывает, что в выбранной конфигурации основное ограничение качества связано с неполнотой набора WH-измерений и регуляризованным восстановлением, а добавленный шум приемника в рассмотренном диапазоне не меняет сравнительный вывод.

Заключение

Результаты подтверждают корректность вычислительной схемы при полном наборе ортогональных кодов и возможность таких измерений. Ошибка порядка 10^{-15} в идеализированных условиях показывает согласованность модели, нормировки матрицы и обратного преобразования. При

частичном наборе измерений восстановление всей рефлектограммы становится чувствительным к регуляризации, поскольку требуется одновременно оценить плавный спад уровня, ступенчатые потери и локальные отражения.

Остаточная реконструкция использует известный базовый профиль и уменьшает сложность восстанавливаемого сигнала. После вычитания Ab из измерений задача сводится к оценке локальных отклонений от фона. Ограничение состоит в том, что базовый профиль в расчетах задан изначально, в реальной системе он будет получен из предварительного измерения и может содержать шум, температурный дрейф, нестабильность источника и ошибку калибровки.

Дальнейшая проверка должна включать меньшие доли измерений, разные стратегии выбора строк матрицы и анализ чувствительности к ошибкам базового профиля.

Список используемых источников

1. Cao Z.-H., Shu D., Zhou D.-P., Peng W. Computational optical time-domain reflectometry // Optics & Laser Technology. 2025. Vol. 181. Article 111952. DOI: 10.1016/j.optlastec.2024.111952.
2. Zhou D.-P., Peng W., Chen L., Bao X. Computational distributed fiber-optic sensing // Optics Express. 2019. Vol. 27. № 12. PP. 17069-17079. DOI: 10.1364/OE.27.017069.

Статья представлена научным руководителем, профессором кафедры сетей связи, доктором технических наук, профессором В. В. Давыдовым.

MODELING OF RESIDUAL REFLECTOGRAM RECONSTRUCTION IN COMPUTATIONAL OPTICAL TIME-DOMAIN REFLECTOMETRY FOR AUTONOMOUS MONITORING OF FIBER-OPTIC COMMUNICATION LINES

Petrov P. S.

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

The paper considers computational reconstruction of reflectograms in optical time-domain reflectometry systems intended for autonomous monitoring of short fiber-optic communication lines. The proposed model represents a reflectogram as a sum of a baseline backscattering profile and a residual component containing local changes in the line. Coded measurements are formed using Walsh–Hadamard sequences and complementary binary patterns. Full and residual reconstruction are compared for a partial set of measurements. The results show that residual reconstruction reduces the mean squared error and increases the signal-to-noise ratio compared with full reconstruction under the same measurement matrix.

Key words: optical time-domain reflectometry, computational reflectometry, fiber-optic communication line, Walsh–Hadamard codes, computational reconstruction, residual reconstruction, reflectogram

УДК 004.383.3

ГРНТИ 47.55.35

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ МАКЕТ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ОСОБЕННОСТЕЙ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ ЗВУКОВЫХ СИГНАЛОВ

А. А. Прасолов, О. А. Свиньина

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В статье рассматривается программируемое устройство – универсальный макет, предназначенный для изучения особенностей цифровой обработки звуковых сигналов. Данный макет может применяться как готовое решение с заданной функциональностью, так и в качестве универсальной аппаратной платформы для разработки собственных алгоритмов частотной, динамической и иных видов обработки аудиосигналов. Универсальность макета позволяет использовать его в ходе выполнения лабораторных работ, а также в рамках проектной и научно-исследовательской деятельности студентов.

цифровая обработка звуковых сигналов, цифровой сигнальный процессор

Одним из неотъемлемых этапов подготовки высококвалифицированных специалистов в области медиатехнологий и телерадиовещания является формирование практических навыков по разработке, отладке и аппаратной реализации алгоритмов цифровой обработки звуковых сигналов (ЦОЗС).

Традиционно в составе учебных планов образовательных программ бакалавриата, магистратуры и специалитета можно встретить дисциплины, посвященные изучению цифровой обработки сигналов и обработки звуковых сигналов в отдельности. Подобный подход приводит к тому, что после завершения обучения молодые специалисты знакомы с теоретическими основами каждой из указанных областей, однако, не имеют уверенно сформированных навыков по практической реализации изученных алгоритмов, особенно при использовании аппаратной реализации на базе микроконтроллеров, цифровых сигнальных процессоров (ЦСП), программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) и систем на кристалле (СнК).

Ограничение практической части учебного процесса исключительно программной реализацией алгоритмов обработки звуковых сигналов, например, с использованием таких прикладных пакетов как MATLAB или

GNU Octave, снижает вовлеченность студентов в процесс обучения. В рамках традиционного подхода к выполнению лабораторных работ студенты, как правило, разрабатывают алгоритмы, предназначенные для постобработки звукового сигнала. Несмотря на то, что студенты могут прослушать аудиофайл, содержащий обработанный сигнал, невозможность изменять параметры алгоритма и наблюдать соответствующее изменение звучания в реальном времени приводит к снижению эффективности изучения теоретических основ, положенных в основу того или иного звукового эффекта.

С другой стороны, отсутствие лабораторных работ, посвященных аппаратной реализации разработанных алгоритмов приводит к тому, что многие типовые операции – дискретизация, квантование, восстановление сигнала – выполняются в программном пакете в идеализированной форме, и в рамках дальнейшей работы обучающиеся сталкиваются с тем, что качественные показатели реальной аппаратуры не соответствуют теоретически ожидаемым. Использование типовых программных продуктов вместо специализированного звукового оборудования дополнительно отдаляет учебный процесс от будущей профессиональной деятельности.

Таким образом, важным аспектом модернизации образовательного процесса подготовки специалистов в области медиатехнологий является формирование у обучающихся уверенных практических навыков работы с оборудованием, используемым в промышленности. Кроме того, приобретение опыта работы с аппаратной реализацией типовых алгоритмов обработки звуковых сигналов будет способствовать стимулированию научной и творческой активности. Многие студенты-первокурсники выражают желание разработать собственное устройство, однако, в процессе обучения сталкиваются с неспособностью самостоятельно применить полученные теоретические знания по схемотехнике, цифровой обработке сигналов и акустике в рамках проектной деятельности. Это подтверждает необходимость сделать подход к изучению различных предметных областей как можно более практикоориентированным.

Обработка звуковых сигналов является наиболее подходящей областью для внедрения нового подхода к обучению. С одной стороны, аудиотехника является областью науки, интуитивно понятной и интересной большинству студентов, с другой стороны, обработка звуковых сигналов не требует большой вычислительной мощности, что существенно снижает объем начальных материальных вложений при модернизации учебной лаборатории. Именно поэтому разработка и аппаратная реализация звуковых эффек-

тов используется в качестве простых и понятных примеров не только в рамках подготовки специалистов в области медиатехнологий, но и в рамках изучения основ цифровой обработки сигналов специалистами других технических направлений.

Для изучения особенностей цифровой обработки звуковых сигналов существует целый ряд решений, существенно отличающихся как по сложности, так и по стоимости.

Традиционно для изучения особенностей аппаратной реализации алгоритмов ЦОЗС использовались отладочные платы, выпускаемые крупными производителями ЦСП и ПЛИС [1-3]. К наиболее популярным учебным отладочным платам относятся такие модели, как SHARC Audio Module на базе ЦСП Analog Devices ADSP-SC589 [4], Spectrum Digital TMS320C6455 DSK на базе ЦСП Texas Instruments TMS320C6455 [5] и Digilent ZedBoard на базе СнК Xilinx Zynq 7000 [6]. Данные отладочные платы оснащены аналоговыми звуковыми входами и выходами и органами управления (кнопки, потенциометры и т. п.) и полностью готовы к использованию в образовательном процессе. Подобные аппаратные решения позволяют студентам получить навыки разработки реального промышленного оборудования, в частности, научиться учитывать ограничение разрядности и особенности передачи сигнала через различные интерфейсы, использовать арифметику с фиксированной точкой, прерывания и механизм прямого доступа к памяти. Однако, это требует наличия у студентов уверенных базовых знаний по низкоуровневому программированию ЦСП и цифровой схемотехнике, отсутствие которых в ряде случаев приводит преподавателей к необходимости разработки дополнительных программных решений, упрощающих настройку оборудования или позволяющих исследовать готовые алгоритмы ЦОЗС [7].

В последнее время среди преподавателей набирают популярность бюджетные отладочные платы на базе микроконтроллеров, например, STMicro STM32F4 Discovery и Nucleo [8,9], Texas Instruments TM4C123G LaunchPad [10] и Arduino Due [11]. Данные отладочные платы не требуют внешних программаторов, однако, для внедрения в учебный процесс в большинстве случаев требуется оснастить их дополнительными платами расширения с аналоговыми звуковыми входами и выходами и органами управления [12]. В связи с широким распространением микроконтроллеров семейства STM32 и Arduino среди инженеров-любителей, большинство студентов старших курсов часто уже имеет начальные навыки работы с ними, что поз-

воляет сосредоточиться на изучении аспектов цифровой обработки сигналов и не заикливаться на особенностях подключения и настройки оборудования [12-14]. Низкая стоимость подобных комплектов позволяет оснастить лабораторию большим количеством рабочих мест, снижает затраты на поддержание учебных лабораторий в рабочем состоянии и позволяет организовать дистанционное обучение [15, 16].

Среди готовых коммерческих аппаратных решений, предназначенных именно для работы со звуковыми сигналами, следует обратить внимание на устройство ЦОЗС Wondom AA-AP2312 [17] на базе ЦСП Analog Devices ADAU1701, предназначенное для прототипирования разделительных фильтров многополосных акустических систем. В отличие от аналогичных устройств на базе того же ЦСП, устройство Wondom имеет большое количество органов управления и позволяет получить полный доступ к функционалу ЦСП, однако, оно не оснащено встроенным программатором, а нестандартный разъем делает невозможным использование официального программатора Analog Devices. Программатор Wondom, в свою очередь, выпускается в виде отдельной платы без корпуса, что делает использование данного аппаратного решения в рамках учебного процесса нецелесообразным ввиду низкой устойчивости к повреждениям.

Таким образом, в рамках работы по модернизации учебной лаборатории акустики и аудиотехники кафедры цифрового телевидения и метрологии было принято решение разработать собственный макет устройства ЦОЗС. В основу нового макета было положено решение, ранее уже использованное авторами при разработке собственных устройств ЦОЗС [18, 19]. Для уменьшения массогабаритных размеров макета и повышения устойчивости к повреждениям была разработана и изготовлена материнская плата, на которой размещаются отладочная плата ADAU1401 и плата EZ-USB FX2LP с микроконтроллером CY7C68013A, выполняющая роль программатора для ЦСП. Дополнительно, на материнской плате реализована схема, позволяющая устранить конфликт сигналов на шине SPI: интерфейс флеш-памяти платы FX2LP и интерфейс программирования ЦСП один и тот же, и при подаче питания на устройство микроконтроллер не всегда может корректно считать встроенное программное обеспечение. Для разрешения данного конфликта на сигналы шины SPI были добавлены тристабильные буферы, которые обеспечивают подключение ЦСП к микроконтроллеру только после того, как в него было успешно загружено встроенное программное обеспечение программатора USBi.

В силу невысокого энергопотребления было принято решение отказаться от использования внешних источников питания. Для исключения проникновения помех от шины USB на плату ЦСП на материнской плате был реализован простой RC фильтр. Подобное решение позволило снизить уровень собственного шума в тракте устройства по сравнению с ранее изготовленным прототипом [18].

Макет имеет два входных и четыре выходных канала, что обеспечивает возможность работы со стереофоническим сигналом или двумя независимыми монофоническими сигналами. Ввод и вывод аналогового звукового сигнала осуществляется с помощью разъемов типа RCA. Для управления параметрами разрабатываемых алгоритмов ЦОЗС разработанный макет оснащен тремя программируемыми датчиками угла поворота с кнопками, а три светодиода на передней панели устройства позволяют организовать визуальный контроль за параметрами звукового сигнала. Корпус макета изготовлен посредством аддитивных технологий (рис. 1). Для повышения качественных характеристик тракта обработки звукового сигнала рекомендуется использовать макет совместно с USB-аудиоинтерфейсом.



Рис. 1. Универсальный макет для изучения особенностей ЦОЗС

Преимуществом реализации макета на базе ЦСП серии SigmaDSP является возможность работы в среде разработки SigmaStudio. Данная среда позволяет разрабатывать алгоритмы с помощью блочно-графического интерфейса, что значительно снижает требования к уровню начальных знаний в области низкоуровневого программирования ЦСП и делает аппаратную обработку звуковых сигналов доступной для большего числа студентов. Дополнительно, блочно-графический интерфейс облегчает установление связи между теоретическими знаниями и практической реализацией.

Помимо использования в качестве универсальной аппаратной платформы для проведения лабораторных работ на старших курсах, макет может быть использован для разработки и отладки собственных алгоритмов частотной, динамической и иных видов обработки аудиосигналов в рамках самостоятельной работы студентов. Предметная область применения макета не ограничена дисциплинами, направленными на изучение только цифровой обра-

ботки сигналов: он может использоваться для исследования влияния частотной коррекции на характеристики акустических систем и помещений, а также для анализа характеристик разделительных фильтров посредством включения в измерительный тракт между источником сигнала и усилителем звуковой частоты. Кроме того, на младших курсах в рамках освоения базовых дисциплин цикла акустики и аудиотехники, данный макет может применяться как готовое решение с заданной функциональностью. Использование реального устройства обработки звуковых сигналов и полноценного двухканального аудиоинтерфейса вместо очередного программного продукта позволит повысить заинтересованность студентов в выполнении лабораторных работ, и, тем самым, увереннее закрепить полученные теоретические знания.

Внедрение разработанного универсального макета в учебный процесс не только позволит студентам получить практические навыки по аппаратной реализации алгоритмов обработки звуковых сигналов, но и повысит мотивацию студентов к изучению профессиональных дисциплин, более активному участию в научно-исследовательской работе кафедры и проектной деятельности университета.

Список используемых источников

1. Kruger H., Lotter T., Vary P. A versatile DSP-system for student-projects on embedded real-time audio signal processing // 2004 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Montreal: IEEE, 2004. V. 5. P. 1033–1036.
2. Barkana B. A Graduate Level Course: Audio Processing Laboratory // 2010 Annual Conference & Exposition Proceedings. Louisville: ASEE Conferences, 2010. P. 15.35.1–15.35.9.
3. Esposito W. J. Mujica F. A., Garcia D.G., Kovacs G. T. A. The Lab-In-A-Box project: An Arduino compatible signals and electronics teaching system // 2015 IEEE Signal Processing and Signal Processing Education Workshop. Salt Lake City: IEEE, 2015. P. 301–306.
4. SHARC Audio Module (ADZS-SC589-MINI) Evaluation Board | Analog Devices // Analog Devices: [сайт]. URL: <https://www.analog.com/en/resources/evaluation-hardware-and-software/evaluation-boards-kits/sharc-audio-module.html#eb-overview> (дата обращения: 30.05.2026).
5. TMS320C6455 DSK Technical Reference. Satfford: Spectrum Digital, Inc., 2006. 74 с.
6. ZedBoard – Digilent Reference // Digilent – Start Smart, Build Brilliant: [сайт]. URL: <https://digilent.com/reference/programmable-logic/zedboard/start> (дата обращения: 30.05.2026).
7. Wright C. H. G., Welch T. B., Morrow M. G. Reinforcing signal processing theory using real-time hardware // 2017 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). New Orleans: IEEE, 2017. P. 6329–6333.
8. STM32F4DISCOVERY | Product – STMicroelectronics // STMicroelectronics: Our technology starts with you: [сайт]. URL: <https://www.st.com/en/evaluation-tools/stm32f4discovery.html> (дата обращения: 30.05.2026).
9. NUCLEO-F072RB | Product – STMicroelectronics // STMicroelectronics: Our technology starts with you: [сайт]. URL: <https://www.st.com/en/evaluation-tools/nucleo-f072rb.html> (дата обращения: 30.05.2026).

10. EK-TM4C123GXL Evaluation board | TI.com // Analog | Embedded processing | Semiconductor company | TI.com: [сайт]. URL: <https://www.ti.com/tool/EK-TM4C123GXL> (дата обращения: 30.05.2026).
11. Arduino Due with Headers | ARM Cortex-M3 Dev Board – Arduino Official Store // Arduino – Home: [сайт]. URL: <https://store.arduino.cc/products/arduino-due> (дата обращения: 30.05.2026).
12. Reay D. S. Hands-on real-time DSP teaching using inexpensive arm cortex M4 development systems // 2014 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). Florence: IEEE, 2014. P. 2224–2227.
13. Xie Z., Zhu Z., Wang Y., Bai Y., Zhang R. Innovative practice of sustainable digital signal processing education // PLoS One. 2026. V. 21, № 1. P. 1–15.
14. Bezzam E., Hoffer A., Prandoni P. Teaching Practical DSP with Off-the-shelf Hardware and Free Software // 2019 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). Brighton: IEEE, 2019. P. 7660–7664.
15. Jalden J., Moreno X. C., Skog I. Using the Arduino Due for Teaching Digital Signal Processing // 2018 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). Calgary: IEEE, 2018. P. 6468–6472.
16. Hochgraf C. Using Arduino To Teach Digital Signal Processing // 2013 ASEE Northeast Section Conference. Northfield: Norwich University, 2013.
17. AA-AP23123 Unbalanced 2-In, 4-Out ADAU1701 DSP Preamp 2-Way Digital Crossover // WONDOM OFFICIAL SHOP – Bluetooth Amplifier Board – Sure Electronics – BCPB – 18650 charger – T-AMP – Volume Control: [сайт]. URL: <https://store.sure-electronics.com/product/800> (дата обращения: 30.05.2026).
18. Прасолов А. А., Свинына О. А. Разработка устройства цифровой обработки звуковых сигналов на базе цифрового сигнального процессора Analog Devices ADAU1401 // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании. XIII Международная научно-техническая и научно-методическая конференция; сб. науч. ст. в 4 т. / Под. ред. Р. В. Киричка; сост. А. А. Нестеров. СПб: СПбГУТ, 2024. Т. 3. С. 389–394.
19. Прасолов А. А., Свинына О. А. Разработка многоканального усилителя звуковой частоты с возможностью цифровой обработки звуковых сигналов // 65-я научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава, научных работников и аспирантов (НТК ППС 2025); сб. науч. ст.: в 3 т. / Под. ред. А. В. Рабина; сост. И. М. Татарникова. СПб: СПбГУТ, 2025. Т. 1. С. 329–335.

A RECONFIGURABLE HARDWARE TESTBED FOR INVESTIGATING DIGITAL AUDIO SIGNAL PROCESSING FUNDAMENTALS

Prasolov A. A., Svinyina O. A.

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

This paper presents a reconfigurable hardware testbed designed for digital audio signal processing education. The system serves a dual purpose: it functions as a turnkey module for exploring pre-defined signal processing operations, or as a flexible development environment for implementing novel audio algorithms. The versatility of this architecture extends its utility beyond structured laboratory sessions, supporting independent student inquiry, academic research, and the iterative development of hardware prototypes.

Key words: digital audio signal processing, digital signal processor

УДК 621.396

ГРНТИ 89.29.02

МОДЕЛИРОВАНИЕ В СРЕДЕ МАТЛАВ КАНАЛА СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ С МОРСКИМИ СУДАМИ

М. С. Рогова¹, А. М. Синильников²

¹Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

²Филиал ФГАУ НИЦ Телеком им. М. И. Кривошеева в г. Санкт-Петербурге

Спутниковая связь с морскими судами широко применяется благодаря возможности обеспечения высокоскоростной передачи данных в любых районах морей и океанов. Существенное влияние на качество связи оказывает качка судна, приводящая к отклонению антенны от направления на спутник и соответственно изменению уровней мощности сигнала. Предлагается построенная в среде MatLab модель канала спутниковой связи с морскими судами в условиях качки в Ku и перспективном Ka диапазоне частот. Приводятся полученные в результате моделирования оценки потерь в скорости передачи данных и подходы к уменьшению потерь методами адаптивного кодирования и модуляции.

спутниковая связь, качка судна, канал спутниковой связи, скорость передачи данных, адаптивное кодирование и модуляция

Спутниковая связь (СС) является единственным видом высокоскоростной цифровой связи с морскими судами, обеспечивающей покрытие на обширных морских и океанских территориях. Существенное влияние на качество связи оказывает качка судна, приводящая к отклонению антенны от направления на спутник и соответственно изменению уровней мощности сигнала и отношения мощности сигнал к мощности шума в полосе сигнала (ОСШ). Для обеспечения гарантированной связи необходимо знать диапазон изменения ОСШ и выбрать сигнально-кодovou конструкцию, обеспечивающую максимальную возможную скорость передачи данных.

ОСШ зависит от параметров качки судна и ряда других факторов. Системообразующие факторы: диапазон используемых частот, характеристики орбит используемой спутниковой группировки, способы обработки сигналов на борту спутников, методы многостанционного доступа и методы организации сети СС. Технические факторы: параметры антенной системы и приемо-передающего тракта судового терминала СС, методы модуляции и кодирования. Учет всего многообразия факторов при оценке изменения

ОСШ во времени в условиях качки судна возможен только с использованием методов имитационного моделирования. В качестве среды моделирования целесообразно использовать специализированные пакеты MATLAB: Antenna Toolbox и Phased Array System Toolbox [1], позволяющие комплексно анализировать пространственно-временные процессы, направленные свойства антенн и их зависимость от углового положения.

В рамках исследования моделируется сеть спутниковой связи с топологией «звезда», построенная на основе спецификаций DVB-S2x и DVB-RCS2 [2,3] с использованием спутника на геостационарной орбите без обработки сигналов на борту. В работе рассматривается линия связи «вниз» (Downlink) – передача радиосигнала от транспондера спутника до судового приемного терминала. При моделировании рассматриваются два варианта исполнения судового терминала: с использованием аппаратной гиростабилизированной платформы, компенсирующей механические отклонения, и при ее отсутствии.

Структура разработанной модели представлена на рис. 1.



Рис. 1. Структура модели канала спутниковой связи с морскими судами.

В качестве исходных данных использовались параметры морской VSAT-системы, функционирующей в Ku- и Ka-диапазонах СС. Для проведения расчетов были выбраны конкретные несущие частоты, типичные для спутниковой линии вниз: 12 ГГц для Ku-диапазона и 20 ГГц для Ka-диапазона. Диаметр антенной системы принимался равным 0,75 м, что соответствует типовым характеристикам современных судовых терминалов. Мощность сигнала, излучаемого транспондером спутника в направлении терминала, задавалась исходя из типовых энергетических бюджетов спутниковых линий связи. Для проведения корректного сравнительного анализа принималось, что в идеальных условиях (при отсутствии качки и точном наведении на спутник) базовое значение ОСШ на входе демодулятора для обоих

частотных диапазонов одинаково и составляет величину, обеспечивающую устойчивую работу со средней спектральной эффективностью.

Величина остаточной ошибки наведения $0,25^\circ$ выбрана в соответствии с рекомендациями Международного союза электросвязи ITU-R [4] для сетей VSAT. Качка моделировалась детерминированным гармоническим колебанием с амплитудой угловых колебаний $A = 5^\circ$ и частотой качки $f_k = 0,2$ Гц, что соответствует условиям умеренного морского волнения и характерно для низкочастотной бортовой качки судна. Использование детерминированного закона для описания качки является классическим и широко применяемым подходом в теории гидродинамики судов, а также в международных методиках расчета спутниковых каналов связи с подвижными морскими объектами [5]. Шум в самом канале связи при этом моделировался как аддитивный белый гауссов шум.

На первом этапе моделирования формировалась временная зависимость угла отклонения антенны относительно направления на спутник. Полученный угол отклонения $\varphi(t)$ использовался при расчете коэффициента усиления антенны $G(\varphi)$.

На следующем этапе выполнялся расчет мощности принимаемого сигнала P_r с учетом изменения коэффициента усиления антенны и воздействия шумовой составляющей P_n . В результате моделирования определялись временные зависимости коэффициента усиления антенны, мощности принимаемого сигнала и ОСШ.

При разработке имитационной модели не учитывались факторы влияния атмосферы, включая газовое поглощение и влияние осадков, а также исключалось влияние эффекта многолучевого распространения радиосигнала. Такие допущения позволяют сосредоточить внимание на исследовании влияния качки судна на энергетические параметры спутникового канала связи и провести сравнительный анализ устойчивости связи в Ku- и Ka-диапазонах при качке судна.

На рис. 2. представлено изменение ОСШ во времени при угловом отклонении антенны в Ka- и Ku-диапазонах в результате качки. При отсутствии средств стабилизации положения антенны даже при незначительной качке наблюдается «провал» ОСШ до 3 дБ в Ku – диапазоне частот и до 5 дБ в Ka – диапазоне частот. Применение антенной системы с гиросtabilизированной платформой позволяет уменьшить величину провала ОСШ до 0,25 дБ в Ku – диапазоне частот и до 1,17 дБ в Ka – диапазоне частот.

С величиной ОСШ тесно связана скорость передачи данных R . В спецификации DVB-S2x представлен набор сигнально-кодовых конструкций (СКК), отличающихся спектральной эффективностью η (бит/Гц) и помехоустойчивостью, обеспечивающей квази-безошибочный прием данных. Для связи выбирается СКК с максимальной η для фактического значения ОСШ. При этом скорость передачи $R = B \times \eta$, где B – ширина полосы частот, занимаемой сигналом. Если в отсутствии качки обеспечивалась величина ОСШ 15 дБ, что позволяло использовать СКК с MODCOD (8PSK 3/4) и при полосе сигнала $B = 36$ МГц обеспечивать скорость $R = 100$ Мбит/с, то в условиях умеренной качки при работе в Ка диапазоне ОСШ может понижаться до 10 дБ для антенной системы без стабилизации, что потребует использовать СКК с MODCOD (QPSK 5/6) и при полосе сигнала $B = 36$ МГц обеспечивать скорость $R = 60$ Мбит/с, т.е. на 40 % меньше. Наличие дорогостоящей и сложной в эксплуатации гиросtabilизированной платформы позволяет при тех-же исходных условиях обеспечивать скорость $R = 90$ Мбит/с, т.е. на 10 процентов меньше.

В спецификациях DVB-S2 и DVB-S2X предлагается механизм адаптивного кодирования и модуляции ACM (Adaptive Coding and Modulation), обеспечивающий выбор сигнально-кодовой конструкции в зависимости от текущего значения ОСШ. При ухудшении ОСШ система СС автоматически переходит к более помехоустойчивым СКК, но обладающим более высокой избыточностью и соответственно меньшей спектральной эффективностью, что приводит к снижению скорости передачи данных, но не нарушает связь [3].

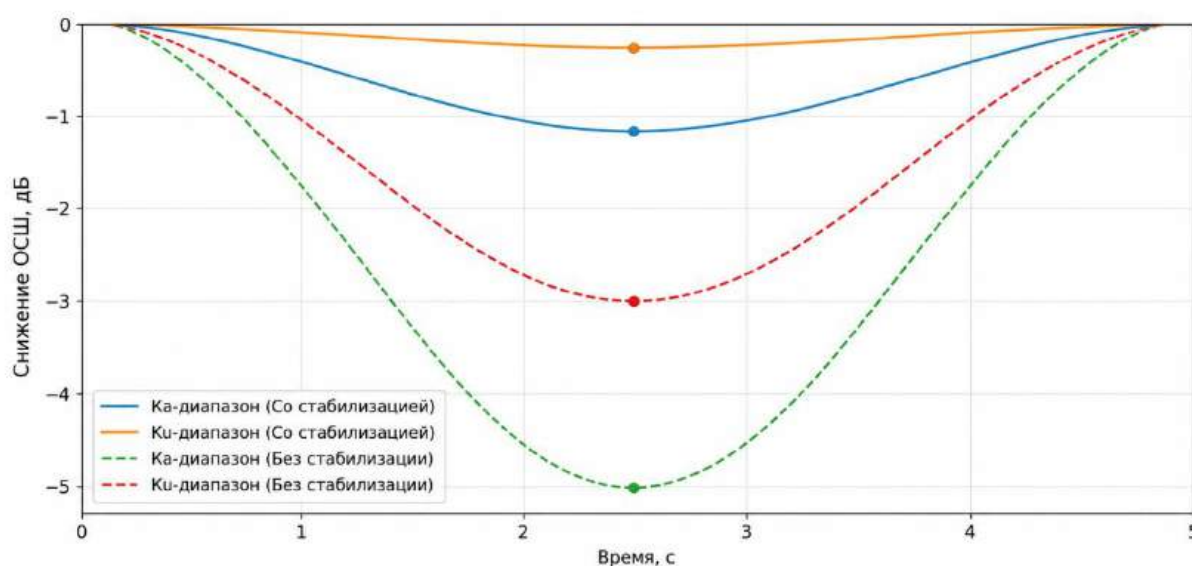


Рис. 2. Изменение ОСШ во времени при качке

На рис. 3. представлено изменение во времени скорости передачи в режиме АСМ при угловом отклонении антенны в Ка – и Ку-диапазонах в результате качки для антенных систем без стабилизации и с стабилизацией. Величина снижения скорости передачи из-за качки зависит от величины ОСШ в отсутствии качки, т.е. от максимальной скорости передачи.

Средняя скорость передачи данных составляет около 75 Мбит/с в Ка-диапазоне и 84 Мбит/с в Ку-диапазоне без стабилизации, а при использовании стабилизации и АСМ возрастает до 95 Мбит/с и 89 Мбит/с соответственно. Это позволяет существенно снизить потери пропускной способности спутникового канала связи в условиях качки.

В модели предполагается мгновенное переключение режимов АСМ. Однако в реальных системах адаптация происходит с задержкой из-за времени, необходимого на оценку параметров канала и передачу команд управления.

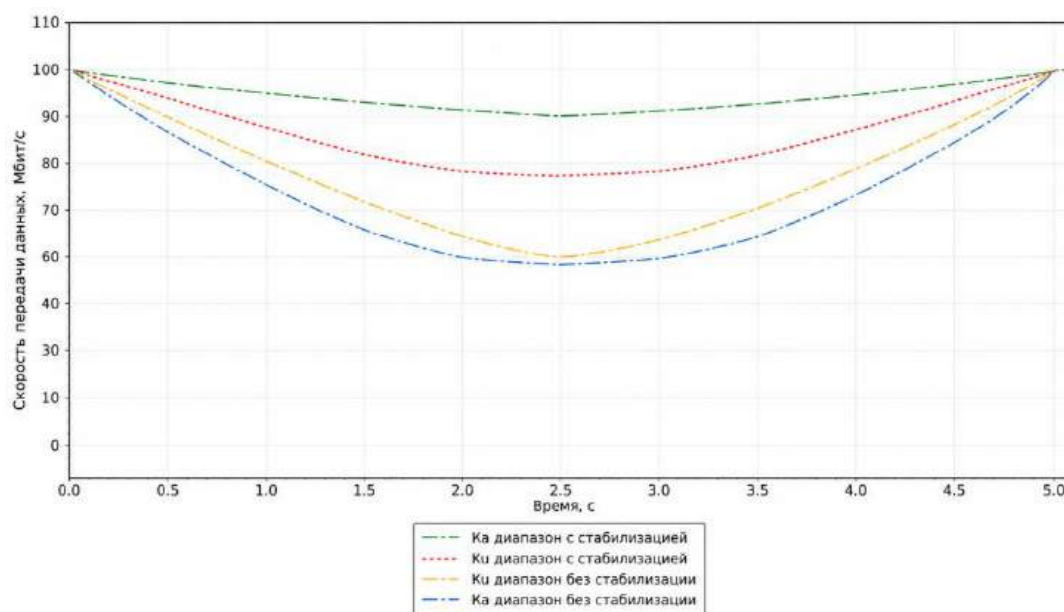


Рис. 3. Изменение скорости передачи данных в режиме АСМ

Анализ результатов показывает, что применение стабилизации антенны обеспечивает более высокую пиковую пропускную способность, однако требует использования сложной аппаратной гиросtabilизированной платформы, характеризующейся высокой стоимостью, повышенной энергоемкостью и чувствительностью к эксплуатационным условиям в морской среде. В то же время применение АСМ позволяет обеспечить устойчивую работу канала при переменных условиях распространения без использования дополнительного механического оборудования, что делает данный под-

ход более практичным с точки зрения эксплуатационной надежности и экономической целесообразности.

Полученные результаты подтверждают целесообразность дальнейших исследований, направленных на оптимизацию алгоритмов АСМ и оценку эффективности использования гиросtabilизированных платформ.

Список используемых источников

1. MathWorks. Antenna Toolbox Documentation // MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/help/antenna/> (дата обращения: 31.03.2026).
2. ETSI EN 302 307-2 V1.3.1. Digital Video Broadcasting (DVB); Second generation framing structure, channel coding and modulation systems for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications; Part II: DVB-S2 Extensions (DVB-S2X). ETSI, 2021
3. ETSI EN 301 545-2 V1.4.1. Digital Video Broadcasting (DVB); Second Generation DVB Interactive Satellite System (DVB-RCS2); Part 2: Lower Layers for Satellite standard. European Telecommunications Standards Institute (ETSI), 2024.
4. ITU-R S.1587-4. Technical characteristics of earth stations on board vessels communicating with geostationary satellites in the fixed-satellite service bands allocated near 14 GHz. Geneva: International Telecommunication Union, 2017.
5. ITU-R P.680-9. Propagation data required for the design of Earth-space maritime mobile telecommunication systems. – Geneva: International Telecommunication Union, 2017.

MODELING IN THE MATLAB ENVIRONMENT OF A SATELLITE COMMUNICATION CHANNEL WITH MARITIME VESSELS

Rogova M.1, Sinilnikov A.2

¹The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

²Branch NTC branch of the FSBI Research Center Telecom named after M. I. Krivosheev in St. Petersburg

Satellite communication with sea vessels is widely used due to the ability to provide high-speed data transmission in any areas of seas and oceans. The rolling of the ship significantly affects the quality of communication, causing the antenna to deviate from the direction to the satellite and, accordingly, changing the signal power levels. It is proposed: a satellite communication channel model with sea vessels under rolling conditions in the Ku and prospective Ka frequency bands, built in the MatLab environment. The results of the modeling provide estimates of data transmission losses and approaches to reducing these losses using adaptive coding and modulation methods.

Key words: *satellite communication, ship roll, satellite communication channel, data transmission rate, adaptive coding and modulation*

УДК 621.396.969

ГРНТИ 47.49.31

РАЗРАБОТКА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ АПРОБАЦИЯ ГЕНЕРАТОРА СИГНАЛОВ СТАНДАРТА LTE

К. Е. Рютин, Г. А. Фокин, В. В. Цап

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Актуальность исследования обусловлена необходимостью оснащения испытательных лабораторий и научных центров отечественными программно-аппаратными средствами для тестирования приемопередающих трактов оборудования сетей четвертого поколения. В статье представлена отечественная программно-аппаратная платформа генератора сигналов стандарта LTE, созданная в полном соответствии со спецификациями 3GPP Release 14. Рассмотрена архитектура устройства, сочетающего программируемый радиотракт и специализированное программное обеспечение, реализующее физический и канальный уровни LTE. Представлены результаты экспериментальной апробации с использованием поверенного измерительного оборудования, подтвердившие корректную работу устройства. Показано, что предложенное решение применимо для верификации пользовательских терминалов, базовых станций и исследования алгоритмов MIMO.

LTE, 3GPP, генератор сигналов, программно-аппаратная платформа, экспериментальная апробация

Сети мобильной связи четвертого поколения (4G) стандарта LTE (Long-Term Evolution) составляют основу инфраструктуры широкополосного беспроводного доступа во многих странах мира. Разработка, производство и последующая сертификация пользовательского оборудования (UE – User Equipment) и базовых станций (eNB – eNodeB) стандарта LTE невозможны без измерительных стендов, обеспечивающих воспроизведение тестовых радиосигналов. Базовым элементом таких стендов служат генераторы эталонных каналов (RMC – Reference Measurement Channels), работа которых регламентирована спецификациями [1–2]; данные приборы позволяют воспроизводить сигналы с нормированными свойствами на физическом и канальном уровнях. Спектр их применения охватывает проверку приемных и передающих модулей сетевого оборудования, отладку процедур цифровой обработки, оценку устойчивости к помехам и экспериментальные исследования конфигураций MIMO (Multiple-Input and Multiple-Output). В условиях курса на импортозамещение и технологическую неза-

висимость вопрос оснащения лабораторий и научных организаций отечественными программно-аппаратными решениями выходит на первый план.

Генераторы сигналов LTE зарубежных производителей [3–5], как правило, представляют собой дорогостоящие приборы с закрытой архитектурой, ограничивающей их модернизацию и адаптацию к новым исследовательским задачам. Кроме того, на данный момент доступ к таким приборам на российском рынке крайне затруднен. Целью настоящей работы является разработка и экспериментальная апробация отечественной программно-аппаратной платформы генератора сигналов стандарта LTE, выполненной в полном соответствии со спецификациями 3GPP Release 14 [6–7].

Разработанное устройство в своей аппаратной части обеспечивает функционирование в интервале центральных частот от 70 МГц до 6000 МГц, а также позволяет задействовать все стандартные значения полосы сигнала LTE в диапазоне от 1,4 МГц до 20 МГц, что в совокупности покрывает все разнообразие конфигураций, используемых в действующих сетях LTE. Внешний вид генератора LTE с подключением к управляющей станции показан на рис. 1.



Рис. 1. Внешний вид генератора LTE с подключением к управляющей станции

Конструктивно прибор выполнен в компактном корпусе, предназначенном для размещения в стандартной 19-дюймовой стойке. Устройство имеет габариты 430×203×44 мм (длина, ширина и высота) и массу около 1,8 кг, что делает его одинаково удобным как для стационарной установки,

так и для применения в передвижных измерительных комплексах. На корпусе предусмотрены два SMA-разъема, соответствующие двум каналам передатчика. В состав генератора интегрирован управляющий вычислитель на архитектуре ARM, благодаря чему возможна его автономная эксплуатация. При использовании внешней управляющей станции, связь с ней осуществляется через интерфейсы Ethernet и USB. На передней панели дополнительно размещен разъем HDMI для вывода рабочего стола управляющего вычислителя генератора на внешний дисплей. Потребляемая мощность устройства не превышает 15 Вт при номинальном напряжении питания 20 В, а максимальная выходная мощность передатчика составляет 1 мВт. Приведенные характеристики обеспечивают работоспособность прибора в лабораторных условиях и одновременно исключают риск насыщения чувствительных входных каскадов тестируемой аппаратуры.

Для программной реализации была разработана библиотека процедур формирования сигналов LTE в соответствии со спецификациями 3GPP. Верификация процедур формирования проводилась путем сравнения результатов выполнения каждой функции разработанной библиотеки с результатами выполнения аналогичных функций из LTE Toolbox среды MATLAB. Для управления генератором была разработана программа с графическим пользовательским интерфейсом с использованием фреймворка Qt. Графический пользовательский интерфейс генератора сигналов LTE представлен на рис. 2.

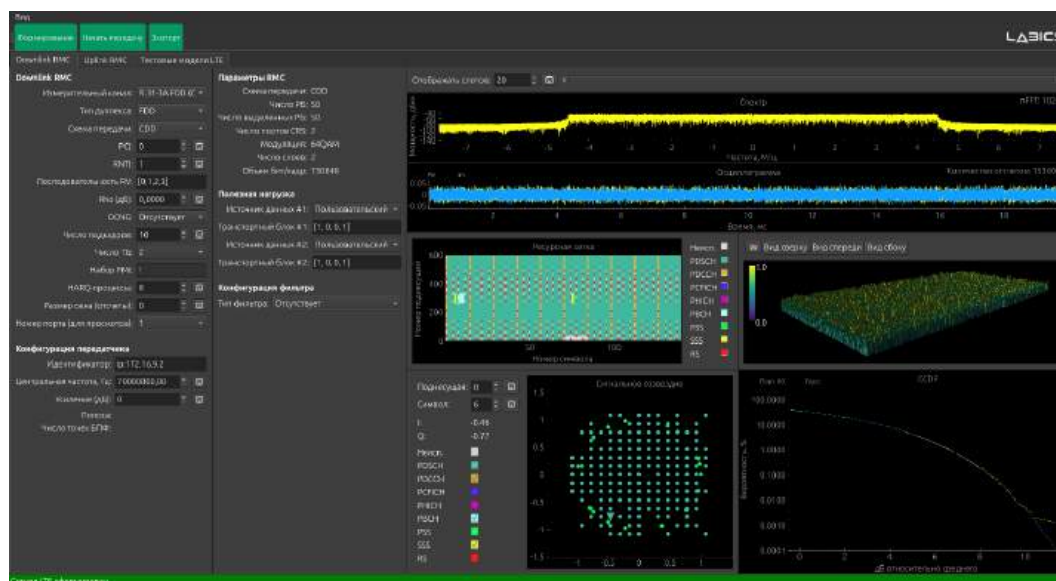


Рис. 1. Графический пользовательский интерфейс генератора сигналов LTE

Пользователь может конфигурировать следующие основные параметры генератора: 1) специфицированный номер RMC; 2) тип дуплекса (частотный или временной); 3) схема разнесенной передачи; 4) физический идентификатор соты (PCI – Physical Cell Identity); 5) временный идентификатор радиосети (RNTI – Radio Network Temporary Identifier); 6) распределение мощности ресурсных элементов канала данных PDSCH (Physical Downlink Shared Channel) в дБ; 7) число формируемых OFDM подкадров; 8) число транспортных блоков; 9) номер антенного порта; 10) центральная частота передатчика в Гц; 11) усиление передатчика в дБ.

Экспериментальная апробация генератора сигналов LTE выполнялась с использованием анализатора спектра и сигналов Anritsu MS2691A. Фотография экспериментального стенда приведена на рис. 3. На стороне генератора была задана схема RMC «R.9» (тип дуплекса: FDD, полоса сигнала: 20 МГц, модуляционная схема: QAM-64). Также, перед формированием был задан PCI, равный 123. На стороне анализатора был зафиксирован передаваемый сигнал с совпадающим PCI. Скриншот экрана анализатора с сигнальным созвездием и величиной вектора ошибки (EVM – Error Vector Magnitude) показан на рис. 4.

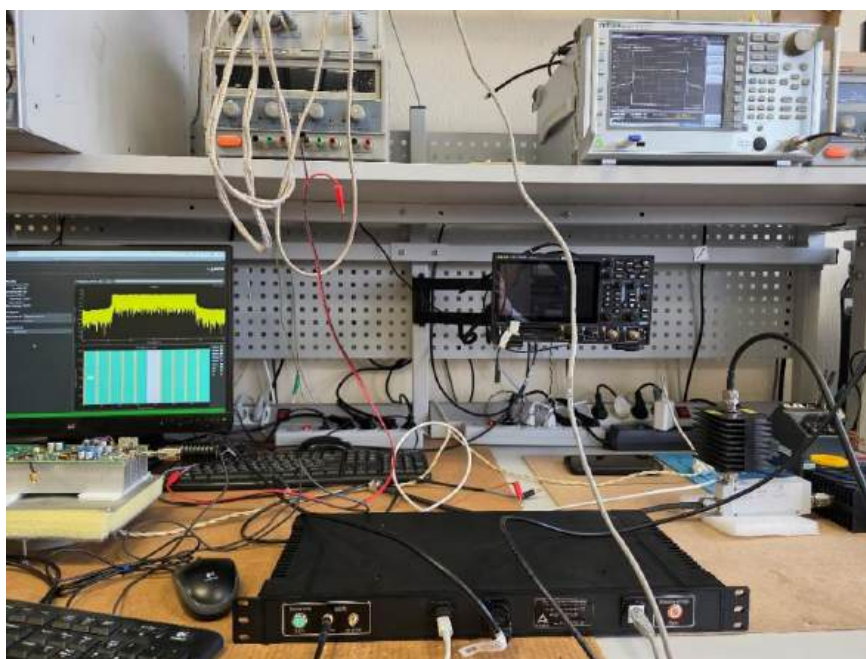


Рис. 2. Фотография экспериментального стенда

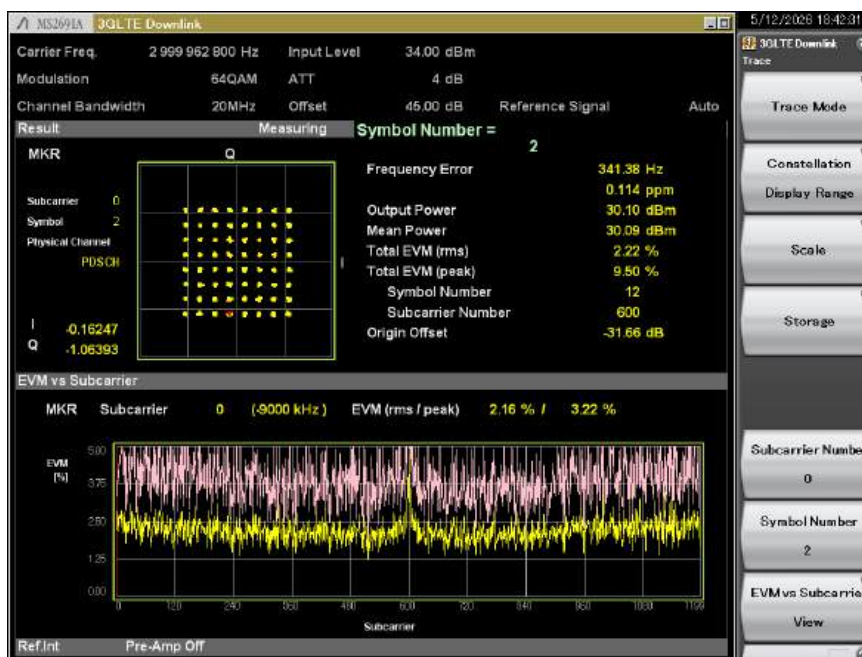


Рис. 3. Сигнальное созвездие и значения EVM на анализаторе Anritsu MS2691A

Величина EVM – это показатель качества цифрового модулированного сигнала, измеряющий разницу между идеальным положением модулированного символа и его фактически принятым положением (выражается в процентах или дБ, показывая влияние шумов, искажений и помех на сигнал). Как видно на рис. 4, среднеквадратичное значение EVM равно 2,22 %, что свидетельствует о высоком качестве передаваемого сигнала. В соответствии со спецификацией [2], для модуляции QPSK допустимый уровень EVM составляет 17,5 %, для QAM-16 – 12,5 %, для QAM-64 – 8 %, а для QAM-256 – 3,5 %.

Экспериментальная апробация с использованием измерительного оборудования подтвердила соответствие формируемых сигналов стандарту LTE. Следовательно, разработанный генератор сигналов LTE может быть применен в качестве составной части измерительного стенда при разработке телекоммуникационного оборудования, в научно-исследовательской работе, а также в учебном процессе профильных образовательных учреждений. Направлением дальнейших исследований и разработок является калибровка выходного сигнала генератора по уровню и частоте во всем рабочем диапазоне.

Список используемых источников

1. 3GPP TS 36.101. “Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio transmission and reception.” 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network.

2. 3GPP TS 36.104. “Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Base Station (BS) radio transmission and reception.” 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network.

3. N7625EMBC PathWave Signal Generation for LTE/LTE-Advanced TDD, Waveform Playback. URL: <https://www.keysight.com/us/en/product/N7625EMBC/signal-generation-lte-lte-advanced-tdd-waveform-playback.html> (дата обращения: 20.04.2026).

4. LTE, LTE-Advanced and LTE-Advanced Pro Digital standards. URL: https://www.rohde-schwarz.com/us/products/test-and-measurement/digital-standards/lte-lte-advanced-and-lte-advanced-pro-digital-standards_63493-1124875.html (дата обращения: 20.04.2026).

5. Vector Signal Generator MG3710E. URL: <https://www.anritsu.com/en-us/test-measurement/products/mg3710e> (дата обращения: 20.04.2026).

6. 3GPP TS 36.211. “Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation.” 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network.

7. 3GPP TS 36.212. “Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Multiplexing and channel coding.” 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network.

Статья представлена научным руководителем, заведующим кафедрой БТС СПбГУТ, доктором технических наук, доцентом Г. А. Фокиным.

DEVELOPMENT AND EXPERIMENTAL VALIDATION OF AN LTE STANDARD WAVEFORM GENERATOR

Ryutin K.

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

The relevance of this study is driven by the necessity to equip testing laboratories and research centers with domestically developed software and hardware tools for evaluating transceiver paths of fourth-generation network equipment. This article presents a domestic software and hardware platform for an LTE signal generator, designed in full compliance with 3GPP Release 14 specifications. The architecture of the device, which combines a programmable radio path with specialized software implementing the physical and channel layers of LTE, is examined. Experimental results obtained using calibrated measurement equipment confirmed correct operation of the device. The proposed solution is demonstrated to be applicable for verification of user terminals, base stations, and research on MIMO algorithms.

Key words: LTE, 3GPP, waveform generator, hardware-software platform, experimental validation

УДК 621.396.677

ГРНТИ 47.45.29

ПРОТОКОЛ УПРАВЛЕНИЯ ЛУЧАМИ В СЕТЯХ 5G NEW RADIO**Д. С. Рябиков**

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Будущие сотовые сети будут в большей степени полагаться на диапазоны миллиметровых волн (mmWave) для увеличения пропускной способности. Переход на более высокие несущие частоты потребует направленного формирования луча для установления и поддержания связи. Интеллектуальные протоколы управления лучами ВМ (Beam Management) будут иметь решающее значение для установления и поддержания соединений между базовой станцией и абонентскими устройствами UE (User Equipment) в канале связи. В этой статье дается краткий обзор протокола управления лучами в сетях 5G New Radio.

5G, Управление лучом, UE, BS, RS, CSI-RS, SSB

Сети сотовой связи пятого поколения (5G) используют диапазоны миллиметровых волн (mmWave) от 24,25 ГГц до 52,6 ГГц для обеспечения высокой скорости передачи данных и поддержки широкого спектра новых сценариев использования. Условия распространения сигнала в диапазонах mmWave значительно более сложные по сравнению с традиционными частотами ниже 6 ГГц из-за высоких потерь в тракте и чувствительности к препятствиям. Для обеспечения покрытия устройства, работающие в диапазоне mmWave, должны выполнять формирование луча BF (Beam Forming) для концентрации энергии сигнала в небольшом угловом пространстве. Следовательно, управление лучами (ВМ), которое в совокупности включает в себя выравнивание луча, мониторинг и отслеживание, а также восстановление после сбоев в работе луча, имеет решающее значение для систем связи в диапазоне миллиметровых волн. Подход к ВМ, установленный в [1], основан в основном на сканировании луча и передаче информации о луче. Однако по мере того, как стандарт 5G расширяется для поддержки более сложных устройств, более высоких диапазонов и более широкого спектра сценариев использования, реализация стандартных процедур ВМ будет испытывать серьезную нагрузку.

В недавних работах представлен полезный обзор процедур управления лучами (BM) в сетях 5G, включая общий обзор [2] и более подробное описание [3], в котором приводится сравнение BM в автономных (SA) и неавтономных (NSA) системах. Дополнительные сведения о спецификации BM, утвержденной в релизах 15 и 16, приведены в [4].

Протокол управления лучами в 5G New Radio

Протокол BM, описанный в [1] текущей версии 5G NR, основан на измерении и передаче данных об опорных сигналах RS (Reference Signals) с формированием луча, передаваемых либо базовой станцией (BS), либо пользовательскими устройствами UE. Базовая станция осуществляет сканирование фиксированного набора лучей с помощью блоков сигналов синхронизации SSB (Synchronization Signal Blocks). В дополнение к SSB базовая станция может выполнять дополнительное сканирование лучей с использованием опорных сигналов с информацией о состоянии канала CSI-RS (Channel State Information RSs). Конечный пользователь измеряет опорные сигналы с помощью различных приемных (Rx) лучей и сообщает о качестве наилучших лучей базовой станции. На основе обратной связи от абонентских устройств базовая станция имеет возможность выбирать среди принятых лучей подходящие для установления связи. В восходящем канале UL (Up Link) абонентское устройство может передавать зондирующие опорные сигналы SRS (Sounding reference signals) для BM.

Структура BM, заданная в текущей версии 5G NR, включает четыре операции: сканирование луча, определение луча, измерение луча, а также обнаружение сбоев в работе луча и его восстановление. Краткое описание этих четырех операций с лучами и соответствующих спецификаций 5G приведено в таблице 1.

Сканирование лучей

Сканирование лучей – это процесс, при котором базовая станция (BS) или абонентское устройство (UE) охватывают пространственную область, последовательно используя различные лучи при передаче или приеме радиосигналов. Базовая станция и абонентское устройство имеют заранее определенные наборы весовых коэффициентов лучей. Во время сканирования луча BS или UE последовательно использует лучи из всех наборов или из конкретного набора, чтобы найти подходящие пары лучей Tx-Rx для каналов данных и управления. На стороне передатчика сканирование лучей

может осуществляться путем отправки RS с формированием луча, таких как SSB и CSI-RS со стороны BS, или SRS со стороны UE. На стороне приемника BS или UE могут просканировать свои приемные лучи при измерении RS с формированием луча, переданных другим устройством. Существует три типа сканирования лучей, как показано на рис. 1.

ТАБЛИЦА 1. Краткий обзор операций по управлению лучом.

Операция управления лучом	Описание
Сканирование луча	BS последовательно перемещает лучи Tx по нисходящим каналам DL (Down Link) RS: SSB для IA, SSB + CSI-RS для подключенных UE
Измерение луча	UE измеряет L1-RSRP DL и передает данные о не более чем четырех RS по каналу PUCCH или PUSCH.
Определение луча	Базовая станция выбирает передающий луч на основе обратной связи от конечного пользователя и сигнализирует о выборе луча путем настройки состояний TCI: RRC + MAC-CE для PDCCH, RRC + MAC-CE + DCI для PDSCH
Обнаружение сбоев и восстановление луча	UE отслеживает расчетный показатель BLER для RS DL и отправляет запросы на восстановление луча через PRACH

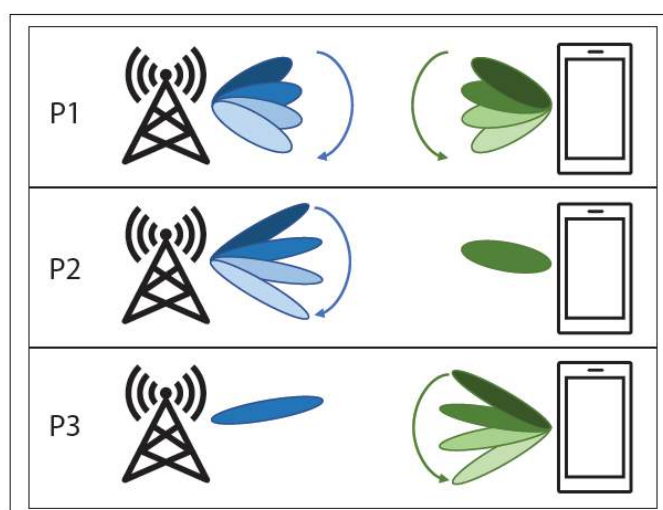


Рис. 1. Типы сканирования луча: выбор луча (P1), уточнение луча BS (P2) и уточнение луча UE (P3).

Процедура 1 (P1) – выбор луча: как базовая станция (BS), так и абонентское устройство (UE) выполняют сканирование лучей. В направлении нисходящего канала (DL) базовая станция периодически сканирует свои пе-

редающие лучи с помощью SSB, в то время как абонентское устройство использует разные приемные лучи для каждого набора SSB.

Процедура 2 (P2) – Уточнение луча для BS: UE фиксирует свой луч, пока BS выполняет сканирование лучей. P2 может использоваться для уточнения луча BS после достижения грубой настройки луча. Если BS использует иерархическую кодовую книгу, она может сканировать узкие лучи широкого луча, найденного в P1, с использованием CSI-RS.

Процедура 3 (P3) – Уточнение луча для UE: BS фиксирует свой луч, пока UE выполняет сканирование лучей. BS может настроить периодические или полупостоянные CSI-RS, которые передаются повторно с использованием одного и того же луча.

Эти три процедуры сканирования лучей носят концептуальный характер и не определены в стандарте. Стандарт не требует, чтобы P1, P2 и P3 были реализованы все. Фактически, в некоторых практических сценариях может быть достаточно одной P1.

Измерение лучей

Базовая станция (BS) или абонентское устройство (UE) измеряет RS в восходящем (UL) или нисходящем (DL) направлениях и сообщает соответствующую мощность принятого опорного сигнала RSRP (Reference Signal Received Power). Передача информации о лучах со стороны UE должна быть настроена BS. В зависимости от возможностей UE, оно может сообщать идентификаторы и измерения до четырех RS в одной передаче. UE, способное одновременно принимать два разных RS, может быть настроено на передачу информации по лучам на основе групп, поэтому оно сообщает о двух разных RS в одной передаче. Передача информации по лучам должна быть запланирована для передачи либо по физическому каналу управления восходящим каналом PUCCH (Physical Uplink Control Channel), либо по физическому общему каналу восходящего канала PUSCH (Physical Uplink Shared Channel).

Определение луча

Для неактивных UE определение и индикация луча осуществляются посредством однозначного сопоставления между каждым SSB и каждым ресурсом канала случайного доступа RACH (Random Access Channel) во время первоначального доступа IA (Initial Access). UE измеряет все SSB, выбирает тот, который имеет наибольшее значение RSRP, и инициирует случайный

доступ, используя RACH, связанный с этим SSB. BS может идентифицировать выбранный луч по RACH, используемому UE.

Для отслеживания лучей базовая станция устанавливает сопоставление между физическими каналами нисходящего канала и каждым RS луча на основе пары лучей, используемой в соответствии с состоянием индикатора конфигурации передачи TCI (Transmission Configuration Indicator). Настраивая состояние TCI для UE, BS сообщает UE, что канал DL будет использовать ту же пару лучей, что и для измерения BM RS, связанного с этим состоянием TCI. Поскольку количество лучей, которые можно настроить в сообщениях нижнего уровня, ограничено, для индикации лучей в 5G используется иерархический механизм обмена сообщениями. Общий пул лучей настраивается с помощью более медленных и дорогостоящих сообщений L3 управления радиоресурсами RRC (Radio Resource Control), в то время как для окончательного выбора луча могут использоваться более быстрые сообщения L1/L2, такие как элемент управления доступом к среде MAC-CE (Medium Access Control Control Element) и информация управления нисходящим каналом DCI (Downlink Control Information).

Обнаружение сбоев и восстановление луча

Конечный пользователь (UE) обнаруживает сбой луча путем мониторинга качества текущих подключенных лучей. Коэффициент блочной ошибки BLER (Block Error Rate) канала управления в нисходящем направлении PDCCH (DL Control Channel) оценивается на основе RSRP блока SS или периодического CSI-RS. Сигнал о сбое луча генерируется, если оцененный BLER превышает заданный порог. Если обнаружено несколько последовательных триггеров сбоя луча, UE начинает поиск альтернативных лучей с лучшим качеством. При сбое луча UE запускает процесс восстановления луча, отправляя запрос на BS через физический RACH PRACH (Physical RACH). Затем BS отправляет ответ на восстановление после сбоя луча, используя новый подходящий луч.

Общий протокол BM был внедрен в [1], ожидается, что будущие выпуски, такие как 17-й и 18-й, еще больше расширят спектр миллиметровых волн, обеспечат поддержку сценариев высокоскоростного использования, обеспечат возможность многопанельной (UE с несколькими антенными решетками) работы в восходящем канале и внедрят дополнительные оптимизации для более эффективного измерения лучей и передачи информации.

Эволюция протоколов управления лучами от базового сканирования к адаптивным и предиктивным методам станет ключевым фактором успеха сетей 5.5G и 6G, позволяя эффективно использовать миллиметровый диапазон в условиях высокой мобильности.

Список используемых источников

1. 3GPP TR 38.331. Radio Resource Control (RRC) protocol specification. Version 15.2.0.
2. Onggosanusi E., Guo L., Kwak Y., Rahman S. Modular and High-Resolution Channel State Information and Beam Management for 5G New Radio // IEEE Commun. Mag. 2018. V. 56. № 3. P. 48–55.
3. Giordani M., Polese M., Roy A., Castor D., Zorzi M. A Tutorial on Beam Management for 3GPP NR at mmWave Frequencies // IEEE Commun. Surveys & Tutorials. 2019. V. 21. P. 173–96.
4. Li. R. Y., Gao B., Zhang X., Huang K. Beam Management in Millimeter-Wave Communications for 5G and Beyond // IEEE Access. 2020. V. 8, P. 13,282–93.

Статья представлена научным руководителем, заведующим кафедрой БТС СПбГУТ, доктором технических наук, профессором Г. А. Фокиным.

BEAM MANAGEMENT PROTOCOL IN 5G NEW RADIO

Ryabikov D.

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

Future cellular networks will rely more heavily on millimeter-wave (mmWave) bands to increase capacity. The transition to higher carrier frequencies will require directional beam-forming to establish and maintain connections. Intelligent Beam Management (BM) protocols will be critical for establishing and maintaining connections between the base station and User Equipment (UE) devices over the communication channel. This article provides a brief overview of the beam management protocol in 5G New Radio networks.

Key words: 5G, UE, BS, RS, CSI-RS, SSB, Beam Management

УДК 621.396.62
ГРНТИ 47.47**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОССТАНОВЛЕНИЯ НЕСУЩЕЙ ЧАСТОТЫ
НА ОСНОВЕ ПЕТЛИ КОСТАСА В ПРОГРАММНОЙ СРЕДЕ MATLAB****Д. А. Сопов**

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. Проф. М. А. Бонч-Бруевича

В работе представлено моделирование петли Костаса в среде MATLAB. Исследован процесс восстановления несущей частоты для однополосного (ОМ) сигнала. Выполнено компьютерное моделирование работы петли в динамическом режиме: построены графики переходных процессов, включая изменение частоты на выходе генератора, управляемого напряжением, и динамику ошибки подстройки фазы во времени. Проанализировано влияние коэффициентов ПИ-регулятора на время захвата петли и величину установившейся ошибки. Исследовано влияние начальной расстройки частоты между входным сигналом и ГУН на способность петли к захвату.

восстановление несущей частоты, петля Костаса, Matlab

Повышение требования к качеству передачи данных в цифровых системах связано, в первую очередь, с улучшением работы систем синхронизации, применяемых для автоматического поддержания параметров сигналов, генерируемых в приемнике, а также определения моментов времени начала тактовых интервалов. Круг задач, решаемых системами синхронизации, весьма обширен: слежение за несущими и поднесущими частотами принимаемых сигналов, когерентная демодуляция аналоговых и цифровых сигналов с частотной и фазовой модуляцией, синхронизация и демодуляция двоичных символов цифровой информации [1]. Однополосная модуляция (ОМ), с точки зрения эффективности использования спектра и энергетической экономичности, является одним из наиболее эффективных способов передачи речевых и телеметрических сигналов. Тем не менее, специалисты в системах связи часто пренебрегают этим видом модуляции в современных цифровых трактах, но на самом деле задача восстановления несущей для ОМ-сигнала не является математически простой, как при частотной манипуляции. Схемы восстановления несущей для однополосного сигнала (включая модификации петли Костаса) представляют собой сложные математические модели, требующие тщательного изучения динамики захвата и устойчивости.

Рассмотрим математическую модель традиционной схемы Костаса, на рис.1 представлена традиционная блок-схема петли, где где ФНЧ1 и фильтр ОС – фильтры нижних частот, ГУН – генератор управляемый напряжением.

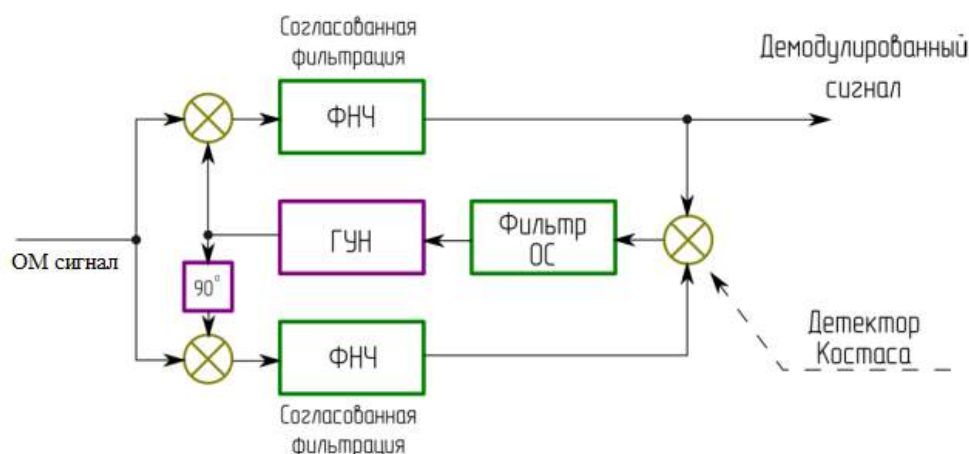


Рис. 1. Схема петли Костаса

Пусть на вход петли Костаса поступает ОМ-сигнал, состоящий из информационного сигнала $d(t)$ и несущего колебания:

$$x(t) = A \cdot d(t) \cdot \sin(\omega_0 t + \theta) \quad (1)$$

где A – пиковое значение амплитуды, ω_0 – частота подавленной несущей, θ – начальная фаза несущей.

Приемнику известна номинальная частота ω_0 , но из-за доплеровского сдвига и нестабильности гетеродина реальная несущая частота и фаза сигнала неизвестны. Схема Костаса содержит два квадратурных канала, управляемых сигналами от ГУН, сдвинутыми друг относительно друга на 90° , представленных в виде:

$$I_{\text{ГУН}}(t) = 2 \cos(\omega_0 t + \hat{\theta}) \quad (2)$$

$$Q_{\text{ГУН}} = -2 \sin(\omega_0 t + \hat{\theta}) \quad (3)$$

где $\hat{\theta}$ – фаза сигнала с ГУН.

После перемножения входного сигнала с сигналами ГУН имеются сигналы вида:

$$I(t) = x(t) \cdot 2 \cos(\omega_0 t + \hat{\theta}) \quad (4)$$

$$Q(t) = x(t) \cdot -2 \sin(\omega_0 t + \hat{\theta}) \quad (5)$$

Поскольку после перемножителей находятся ФНЧ, которые подавляют гармоники частоты $2\omega_0$, то колебание на выходе содержат только низкочастотные компоненты. [2]

В данных сигналах, фаза используется для отслеживания ошибки подстройки (разность между фазой входного сигнала и фазой гетеродина). Для

того, чтобы сформировать сигнал ошибки, который будет воздействовать на ГУН, необходимо перемножить два этих сигнала:

$$e(t) = I_{\text{ФНЧ}} \cdot Q_{\text{ФНЧ}} = \frac{1}{2} A^2 d^2(t) \sin(2\theta_{\text{ошиб}}) \quad (6)$$

где $\theta_{\text{ошиб}}$ – разность фаз входного сигнала и сигнала с ГУН.

Сигнал ошибки $e(t)$ после фильтрации петлевым фильтром преобразуется в управляющее напряжение. Петлевой фильтр, часто с передаточной функцией, определяет динамические характеристики замкнутой системы [3]. ГУН изменяет свою частоту в соответствии с полученным управляющим сигналом.

В рамках данной статьи, для исследования работоспособности петли Костаса при демодуляции однополосного сигнала с подавленной несущей был разработан скрипт в среде MATLAB, с помощью математического аппарата, изложенного выше. Данный скрипт позволяет менять параметры каждого блока схемы, для исследования свойств восстановления несущей и подстройки фазы сигнала. На рис. 2 представлены результаты моделирования, содержащие: входной сигнала, сигналы на синфазном и квадратурном канале с ГУН, демодулированный сигнал до компенсации, демодулированный сигнал после компенсации, спектры ОМ и демодулированного сигналов, отношения сигнал/шум выходного сигнала, коэффициент корреляции (для оценки правдоподобия демодулированного сигнала) и задержка.

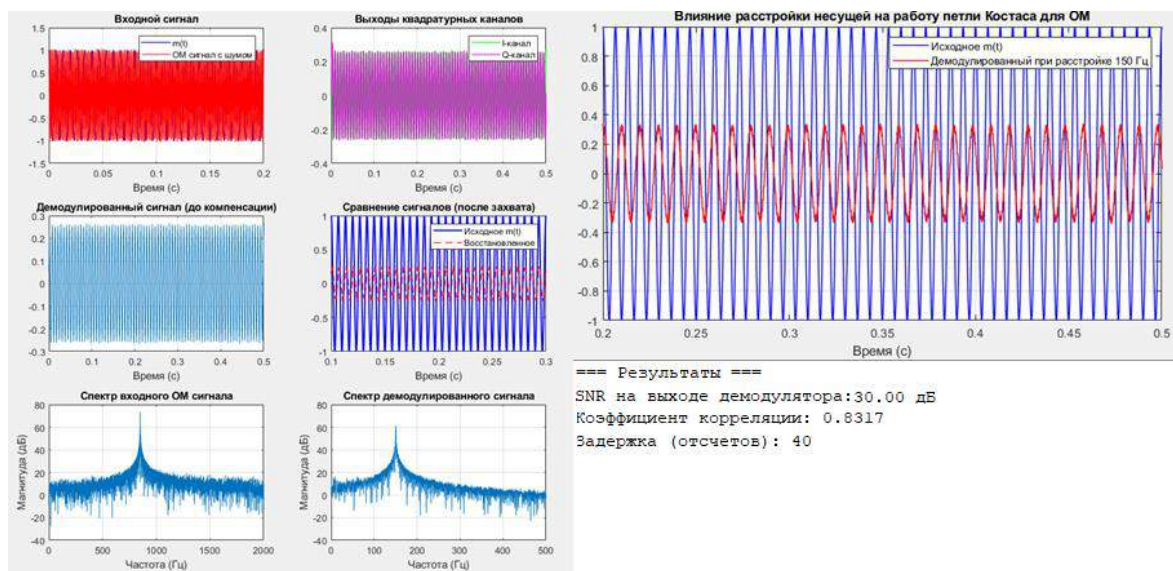


Рис. 2. Выходные данные моделирования

Представленные выше данные пока, что настройка резонансной частоты и полосы пропускания фильтров ФНЧ напрямую влияют на корректность де-

модуляции сигнала. В случае установки слишком большой полосы пропускания коэффициент корреляции составил 0.0534. Это объясняется тем, что слишком широкая полоса пропускания ФНЧ пропустит в сигнал ошибки высокочастотные составляющие информационного сигнала. В результате сигнал ошибки перестанет быть пропорциональным только фазовому рассогласованию, что сделает невозможной устойчивую подстройку фазы.

Также, было проанализировано влияние коэффициентов ПИ-регулятора на время захвата петли и величину установившейся ошибки, путем изменения этих коэффициентов. На рис.3 и рис.4 представлены выходные данные моделирования.

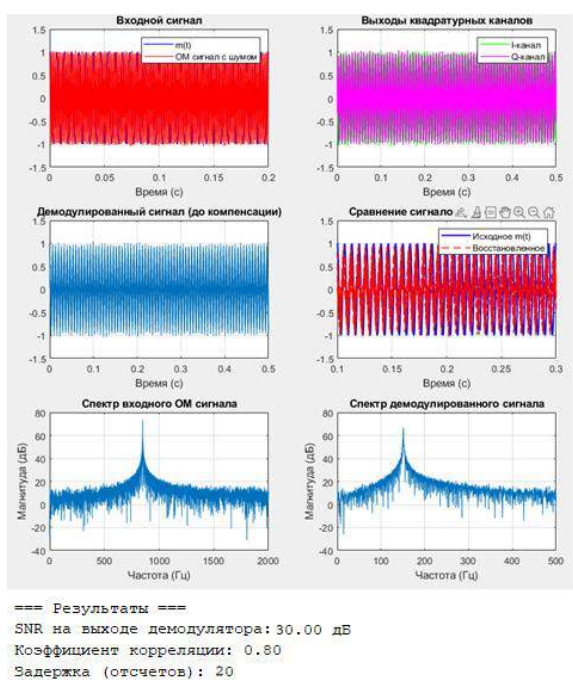


Рис. 3. Результаты моделирования при увеличении пропорционального коэффициента

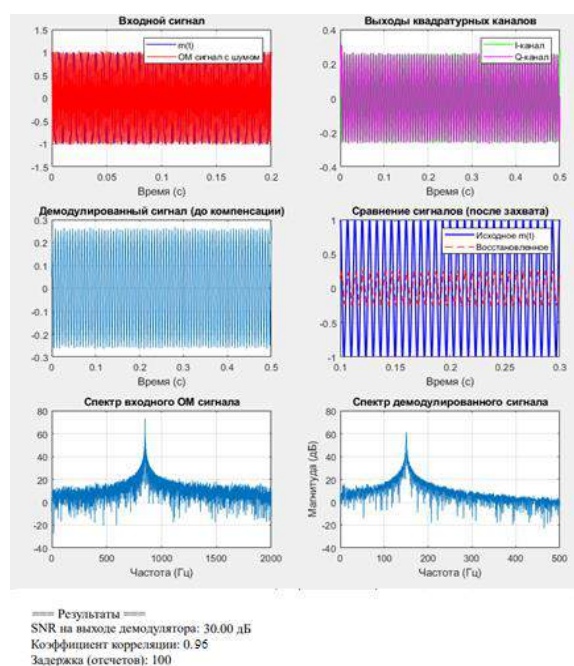


Рис. 4. Результаты моделирования при увеличении интегрального коэффициента

Исходя из полученных данных, видно, что увеличение значения пропорционального коэффициента приводит к уменьшению времени захвата (2 мс), однако уменьшается коэффициент корреляции в следствии появления колебаний частоты. Увеличения интегрального коэффициента, наоборот, увеличивает коэффициент корреляции, но при этом, растет время захвата петли (10 мс). Таким образом, настройка ПИ-регулятора в петле Костаса – это классический компромисс между быстродействием и максимальной правдоподобностью демодулированного сигнала.

Список используемых источников

1. Шахтарин Б. И. Анализ гибридной системы фазовой и тактовой синхронизации / Б. И. Шахтарин, И. А. Кульков // Вестник МГТУ им. Н. Э . Баумана. Серия «Приборостроение». 2013. № 1. С.40-50
2. Егоров Д. В. Анализ и моделирование схемы Костаса для приема 2-ФМ сигналов при наличии детерминированной помехи и белого гауссовского шума // Политехнический молодежный журнал 2017. № 3(8). С. 4
3. Бест Р. Э., Кузнецов Н. В., Леонов Г. А., Юлдашев М. В., Юлдашев Р. В. Руководство по динамическому анализу петли Костаса, // Annual Reviews in Control 2016. том 42. с. 27–49.

Статья представлена заведующим кафедрой БТС СПбГУТ, доктором технических наук, доцентом Г. А. Фокиным.

**INVESTIGATION OF CARRIER FREQUENCY RECOVERY BASED
ON THE COSTAS LOOP IN THE MATLAB SOFTWARE ENVIRONMENT**

Sopov D.

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

The paper presents the simulation of the Costas loop in the MATLAB environment. The process of carrier frequency recovery for a single-sideband (SSB) signal is investigated. Computer simulation of the loop operation in the dynamic mode is performed: transient response graphs are plotted, including the frequency variation at the output of the voltage-controlled oscillator and the dynamics of the phase adjustment error over time. The influence of the PI-controller coefficients on the loop lock time and the steady-state error is analyzed. The effect of the initial frequency detuning between the input signal and the VCO on the loop locking capability is studied.

Key words: carrier frequency recovery, Costas loop, MATLAB

УДК 621.397.132

ГРНТИ 47.51.39

ПОДГОТОВКА СПЕЦИАЛИСТОВ ТВ К РАБОТЕ В ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫХ ИММЕРСИВНЫХ СРЕДАХ

Д. А. Татаренков

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В работе представлена структура учебной дисциплины, направленной на освоение технологий иммерсивной и смешанной реальности (VR/MR) в рамках подготовки специалистов современного телевизионного производства. Описанная система модулей базируется на сквозном процессе разработки контента: от высокополигонального моделирования в Maya и Blender до текстурирования в Substance Painter и финальной сборки сцен в Unreal Engine 5. Особое внимание уделено специфике виртуального продакшна и рендерингу в реальном времени, что позволяет студентам освоить принципы интеграции цифровых декораций в прямой эфир. Научная новизна заключается в систематизации методических подходов к обучению междисциплинарному стеку технологий, объединяющему классическое телепроизводство и инструментарий разработки компьютерных игр. Практическая значимость подтверждается возможностью внедрения комплекса в учебные планы для формирования компетенций, востребованных в медиаиндустрии.

иммерсивные среды, смешанная реальность, виртуальный продакшн, Unreal Engine 5, Maya, Blender, Substance Painter, медиаобразование, риггинг, скиннинг

Индустрия телевизионного вещания переживает глобальную технологическую трансформацию. Стандартные методы видеопроизводства дополняются трехмерной графикой и технологиями интерактивного взаимодействия. Реальные декорации студийных павильонов дополняют технологии рир-проекции. Но сейчас статичные рир-проекции – не статический хромакей, а система виртуального видеопроизводства с использованием светодиодных экранов повышенной плотности пикселей и отслеживания положения и ориентации камер. Таким образом квалификация специалистов должна включать в себя навыки работы с технологиями расширенной (XR), виртуальной (VR) и смешанной (MR) реальности. Такой подход формирования телеэфира требует подготовки кадров нового типа – «медиаинженеров» [1], которые должны обладать пониманием законов классической режиссуры, операторского мастерства, работы со светом, но кроме того иметь технические навыки

в области 3D-моделирования, оптимизации моделей, процедурного текстурирования и работы с движками, формирующими изображения в реальном времени. Существующие образовательные программы не отвечают современным требованиям. Обучение трехмерной графике нередко изолировано от специфики вещательного процесса, а подготовка телевизионных специалистов игнорирует инструментарий производства компьютерных игр. Целью настоящего исследования является разработка и теоретическое обоснование структуры междисциплинарного учебно-методического пособия, реализующего сквозной технологический цикл создания иммерсивного контента для нужд телевизионного производства с использованием программного обеспечения промышленного стандарта: Autodesk Maya, Blender, Adobe Substance Painter и Epic Unreal Engine 5.

Теоретическую основу исследования составляют работы в области медиаобразования, теории иммерсивности и систем виртуального продакшна. Иммерсивность эволюционирует от пассивного наблюдения к интерактивному взаимодействию с трехмерным пространством. Технологический фундамент виртуального производства подробно описан в индустриальных стандартах и спецификациях ведущих разработчиков (Epic Games, SMPTE) [2].

Разрабатываемый методический комплекс построен на модульном принципе и сквозном проектировании. Студентам предлагается сквозная задача: разработка интерактивного элемента или полноценной виртуальной студии для телепередачи, проходящая через все стадии производственной цепочки. Архитектура лабораторного комплекса состоит из трех взаимосвязанных блоков: моделирование 3D-моделей, оснастка и распределение весов в компьютерных программах Maya или Blender, текстурирование в Substance Painter, интеграция и вещание при помощи Unreal Engine 5 [3].

Целью первой лабораторной работы является освоение методологии оптимизации трехмерной геометрии для обеспечения кадровой частоты не менее 60 кадров в секунду в движке реального времени. Студенты изучают принципы топологии трехмерных сеток. На первом этапе создается детализированная модель декорации или объекта студии с применением инструментов сглаживания и фасок. На втором этапе выполняется ретопология – построение оптимизированной низкополигональной сетки, в точности повторяющей силуэт оригинала. Важным математическим критерием здесь выступает бюджет полигонов. Студенты рассчитывают плотность сетки по формуле:

$$D = \frac{N_{poly}}{S_{world}}$$

где N_{poly} – количество треугольников, S_{world} – условная площадь объекта в виртуальном пространстве. Максимально допустимое значение D жестко лимитируется для предотвращения перегрузки графического конвейера.

Во второй лабораторной работе студентам предлагается проектирование двумерных координат для корректного наложения текстурных карт на трехмерные объекты сложных форм при помощи Blender UV Editing, Maya UV Toolkit. Студенты осваивают алгоритмы минимизации потяжек и эффективного использования пространства текстурного листа. Изучаются понятия швов, островков и тексельной плотности. Тексельная плотность рассчитывается для приведения всех объектов сцены к единому разрешению текстур:

$$TD = \frac{Res_{tex}}{L_{world}}$$

где Res_{tex} – разрешение текстуры в пикселях, L_{world} – метрический размер объекта в мире. Студенты учатся применять упаковочные алгоритмы для достижения эффективности заполнения UV-пространства не менее 85-90 %.

В третьей лабораторной работе студенты импортируют модели, выполняют процедуру запекания карт нормалей. Карта нормалей вычисляется на основе разности векторов нормалей поверхностей высокой и низкой плотности. Целью работы является освоение концепции физически корректного рендеринга (Physically Based Rendering, PBR) и методов переноса детализации с высокополигональных моделей на оптимизированные.

Следующий этап – создание иерархической системы костей (скелета) и управляющих элементов (контроллеров), где студентам необходимо правильно определить кинематические связи прямой (FK) и инверсной (IK) кинематики. Вид кинематики важен для анимации как для антропоморфных персонажей, так и для механических элементов (например, операторских кранов-роботов, различных жестких механизмов). В процессе определения весов влияния (скиннинга) каждой вершине модели назначается степень влияния каждой кости. Цель этого шага – добиться плавных деформаций геометрии без артефактов и самопересечений. Математически положение ведомой вершины P' рассчитывается согласно уравнению:

$$P' = \sum_{i=1}^n w_i \cdot M_i \cdot P$$

где w_i – вес влияния i -й кости, M_i – матрица трансформации кости, P – исходное положение вершины. Выполнение методических указаний позволяет научиться готовить цифровых аватаров к интеграции с системами захвата движений и изменять позу непосредственно во время телеэфира. Для этого могут использоваться оптические системы отслеживания положения тела или костюмы с инерциальными датчиками.

Следующим этапом производственной цепочки является импорт подготовленных моделей посредством контейнера FBX в движок Unreal Engine. После чего для получения реалистичного изображения разбираются основы работы технологии Lumen – динамической системы глобального освещения, отражений и преломления лучей. Студенты настраивают параметры источников света (Directional Light, Sky Light, Rect Light, Point Light), осваивают принципы использования карт освещения (HDRI). Дополнительно уделено внимание технике постобработки для достижения желаемого качества изображения с применяемыми параметрами. Особое внимание уделяется настройке внутренних и внешних параметров камер, экспозиции и баланса белого для соответствия реальным студийным камерам и освещению сцены. Полученный результат студент может просматривать при помощи шлема виртуальной реальности для более точного контроля положения объектов в сцене.

На заключительном этапе курса рассматривается процесс взаимодействия созданного в Unreal Engine 5 3D-контента с кадрами реального съемочного павильона. Таким образом студент знакомится с виртуальным ТВ-производством (Virtual Production) [4].

Разработанный учебно-методический комплекс позволит студентам обрести необходимые навыки для современного телевизионного производства. Комплекс включает в себя полностью процесс работы с 3D-контентом: от трехмерного моделирования к совмещению виртуальных и реальных объектов в одном кадре с минимальными задержками.

Список используемых источников

1. РТУ МИРЭА и ВГТРК открывают мегалабораторию будущего для медиаинженеров цифрового телевидения и звука. Новости РТУ МИРЭА. URL:

<https://www.mirea.ru/news/rtu-mirea-i-vgtrk-otkryvayut-megalaboratoriyu-budushchego-dlya-mediainzhenerov-tsifrovogo-televideni/> (дата обращения: 31.05.2026).

2. SMPTE SMPTE ST 2110 – Society of Motion Picture & Television Engineers. URL: <https://www.smpte.org/standards/st2110> (дата обращения: 31.05.2026).

3. Татаренков Д. А. Использование платформы Unreal Engine для создания приложений виртуальной реальности // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании. XI Международная научно-техническая и научно-методическая конференция: сб. науч. ст. в 4 т. СПб.: СПбГУТ, 2022. Т. 3. С. 392-396.

4. Татаренков Д. А. Использование Unreal Engine для создания виртуальной студии // Подготовка профессиональных кадров в магистратуре для цифровой экономики. Сборник лучших докладов конференции ПКМ-2022. СПб.: СПбГУТ, 2023. С. 101–105. EDN: AKDZVV.

Статья представлена заведующим кафедры ТВиМ СПбГУТ, кандидатом технических наук, доцентом С. Л. Федоровым.

TRAINING TV SPECIALISTS FOR WORK IN HIGH-TECH IMMERSIVE ENVIRONMENTS

Tatarenkov D.

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

The paper presents the structure of an academic discipline aimed at mastering immersive and mixed reality (VR/MR) technologies as part of training specialists for modern television production. The described system of modules is based on an end-to-end content development pipeline: from high-poly modeling in Maya and Blender to texturing in Substance Painter and final scene assembly in Unreal Engine 5. Special attention is paid to the specifics of virtual production and real-time rendering, which allows students to master the principles of integrating digital sets into live broadcasting. The scientific novelty lies in the systematization of methodical approaches to teaching a interdisciplinary technology stack that combines classical television production and computer game development tools. The practical significance is confirmed by the possibility of integrating the complex into curricula to form competencies in demand in the media industry.

Key words: *immersive environments, mixed reality, virtual production, Unreal Engine 5, Maya, Blender, Substance Painter, media education, rigging, skinning*

УДК 004.946

ГРНТИ 28.23.15

О ПРИМЕНИМОСТИ ИНЕРЦИАЛЬНОГО ЗАХВАТА ДВИЖЕНИЙ ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ В СИСТЕМЕ ТЕЛЕПРИСУТСТВИЯ

Д. А. Татаренков, Д. Д. Федотов

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В статье рассматривается первичная оценка применимости инерциального захвата движений пользователя для системы телеприсутствия с цифровым аватаром. В качестве экспериментальной платформы использован костюм Perception Neuron 2.0 с тридцатью двумя датчиками и программным обеспечением Axis Neuron. Проведены тестовые записи, в которых движения пользователя фиксировались неподвижной камерой, а работа скелетной модели записывалась средствами захвата экрана. По видеоматериалам выполнена оценка задержки передачи движения, статической стабильности, дрейфа, повторяемости жестов и видимых артефактов суставов. Полученные данные не рассматриваются как окончательная метрологическая оценка системы, но позволяют выделить параметры, важные для дальнейших исследований и разработок в данной области.

телеприсутствие, инерциальный захват движений, цифровой аватар, виртуальная реальность, Perception Neuron, задержка, дрейф, виртуальный продакшен, FBT

Системы телеприсутствия постепенно уходят от обычной видеосвязи к более сложному представлению человека в удаленной или виртуальной среде. Для такого сценария уже недостаточно передать только изображение лица и голос: пользователь должен иметь возможность действовать в цифровом пространстве, а его поза и жесты должны быть понятны другим участникам. В аналитических материалах виртуальная и дополненная реальность рассматриваются как часть набора сквозных цифровых технологий [1], а в нормативных материалах по виртуальной реальности отдельно подчеркивается, что важна не сама трехмерная картинка, а связка визуального отображения, реакции среды и действий пользователя [2]. Поэтому захват движений можно рассматривать как один из базовых модулей телеприсутствия, особенно если вместо видеокадра используется виртуальный персонаж.

Виртуальный аватар в такой системе выполняет не декоративную, а коммуникативную функцию. Через него передаются направление взгляда,

положение корпуса, жесты рук и общий темп движения. Исследования аватар-опосредованной деятельности показывают, что ощущение присутствия связано с возможностью воспринимать объект или другого человека как действующего в той же среде [3]. По этой причине для учебных, демонстрационных и производственных сценариев важно не только качество модели, но и то, насколько естественно она повторяет движения реального пользователя.

Для регистрации движений применяются разные подходы: оптические системы с камерами, безмаркерный видеоанализ, механические и инерциальные решения. Оптический видеозахват хорошо изучен и может давать высокую точность, но обычно требует подготовленного помещения, синхронизации камер и контроля видимости маркеров [4]. В обзорах биомеханических систем также отмечается, что выбор метода зависит от задачи: медицинская диагностика, спорт, реабилитация, анимация и виртуальная среда предъявляют разные требования к точности, мобильности и стоимости стенда [5].

Инерциальный костюм интересен тем, что не зависит от внешних камер и может работать в обычной аудитории или лаборатории. Его слабое место связано с тем, что датчики измеряют ориентацию и ускорение сегментов тела, а положение всей модели восстанавливается алгоритмически. В литературе по инерциальному трекингу это обычно связывают с задачами слияния данных датчиков, накоплением ошибки и необходимостью калибровки [6]. При этом универсального способа отслеживания без ограничений не существует: для каждой технологии приходится отдельно учитывать задержку, точность, устойчивость и удобство пользователя [7].

В проведенном эксперименте использовался комплект Perception Neuron 2.0 с тридцатью двумя датчиками. Согласно руководству Axis Neuron, датчик Perception Neuron представляет собой инерциальный измерительный модуль, включающий акселерометр, гироскоп и магнитометр, а программное обеспечение принимает данные от костюма, обрабатывает их и может экспортировать движение во внешние форматы [8]. Экспериментальный стенд включал пользователя в костюме, программу Axis Neuron, запись экрана через OBS и неподвижную камеру, направленную на пользователя и проекцию экрана. Один из фрагментов записи приведен на рис. 1.



Рис. 1. Кадровый фрагмент экспериментальной записи с пользователем и проекцией скелетной модели

Методика первичной обработки была выбрана простой и воспроизводимой. Для оценки задержки в видео с камеры находились события, где одновременно видны начало движения человека и реакция скелетной модели на проекции. Частота записи составляла 50 кадров в секунду, поэтому один кадр соответствовал 20 миллисекундам. Для каждого события фиксировались кадр начала движения человека и кадр начала соответствующего движения аватара, после чего разница переводилась в миллисекунды. Стабильность, дрейф и артефакты оценивались визуально по шкале от 1 до 5, где 1 означает минимальное проявление проблемы, а 5 – сильный артефакт, мешающий использованию системы.

Всего были обработаны три основных теста. В первом тесте преобладали разведение и подъем рук, во втором – указательные жесты и движения перед корпусом, в третьем – повторяющиеся жесты после повторной записи. Сопоставление файлов камеры и записи экрана выполнялось по длительности и характерным движениям. Сводные результаты приведены в ТАБЛИЦЕ 1.

ТАБЛИЦА 1. Сводные результаты первичной обработки экспериментальных записей

Тест	Средняя задержка	Диапазон	Стабильность	Основное наблюдение
1	96 мс	20–160 мс	2/5	крупные движения рук передаются устойчиво, заметны мелкие ошибки кистей
2	92 мс	20–200 мс	2/5	указательные жесты читаются, сильнее заметно скольжение стоп
3	88 мс	20–300 мс	2/5	дрейф и ошибки локтей/кистей выражены сильнее, чем в первых тестах

Средняя задержка по выбранным событиям оказалась близкой во всех трех тестах: 96 миллисекунд в первом, 92 миллисекунды во втором и 88 миллисекунд в третьем. Сводная диаграмма по задержке показана на рис. 2.

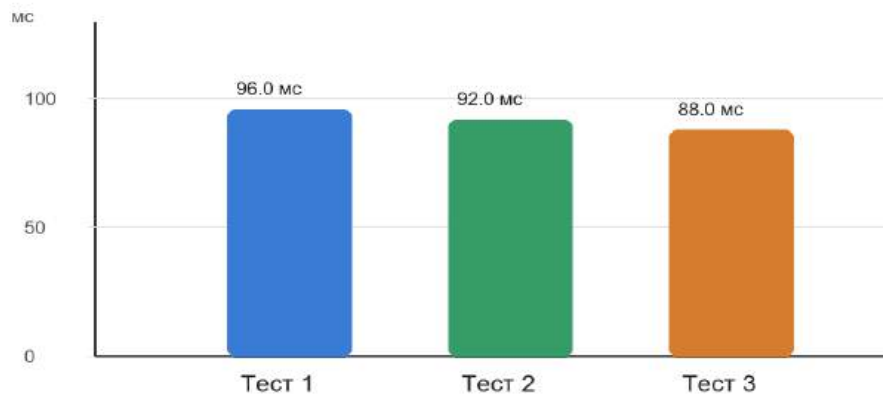


Рис. 2. Средняя задержка передачи движения по результатам покадровой оценки

По статической стабильности все три теста получили оценку 2 из 5. Это означает, что модель в стойке в целом удерживала позу, но мелкое дрожание кистей, предплечий и стоп было заметно. Во втором тесте сильнее проявилось скольжение стоп, а в третьем выросла оценка дрейфа до 3 из 5. Наиболее заметные артефакты относились к кистям, локтям и положению стоп. Крупные движения, например разведение рук и указательный жест, передавались узнаваемо, но мелкая моторика и точная ориентация кистей пока требуют отдельной проверки.

Для задач телеприсутствия полученный результат можно считать удовлетворительным. Инерциальный костюм хорошо передает общую позу и крупные жесты, а отсутствие внешних камер делает стенд мобильным. С другой стороны, при использовании цифрового аватара пользователь сразу замечает задержку, дрожание конечностей и скольжение стоп, потому что эти ошибки нарушают ощущение связи между реальным телом и моделью. В обзорах по полному отслеживанию тела в виртуальной реальности также отмечается, что на качество погружения влияют не только наличие аватара, но и точность, задержка, устойчивость и форма представления тела [9].

Ограничения проведенного этапа связаны прежде всего с тем, что измерения выполнялись по видеозаписям, а не по синхронизированному потоку координат. Задержка была рассчитана покадрово и может быть воспроизведена по исходным видео, однако дрейф и стабильность пока оценены визуально.

По итогам первичной обработки можно сделать вывод, что инерциальный захват движений применим для начального прототипа телеприсут-

ствия, если основная задача заключается в передаче общей позы и выразительных жестов пользователя. Для сценариев, где требуется точная работа кистей, устойчивое положение стоп или длительная запись без коррекции, необходима дополнительная проверка. Следующий этап работы должен быть связан с расширением набора тестов, созданием сцены в Unreal Engine 5 и переходом от визуальной оценки к количественному анализу данных скелета.

Список используемых источников

1. Определения: технологии виртуальной и дополненной реальности / Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики». URL: https://issek.hse.ru/analysis/ar_vr_definition (дата обращения: 29.05.2026).
2. ГОСТ Р 72027.1-2025 (ISO/IEC TR 23842-1:2020). Информационные технологии в обучении, образовании и подготовке. Руководящие указания по контенту виртуальной реальности с учетом человеческого фактора. Часть 1. Рекомендации по использованию контента виртуальной реальности.
3. Белозеров С. А. Виртуальные миры: анализ содержания психологических эффектов аватар-опосредованной деятельности // Экспериментальная психология. 2015. Т. 8. № 1. С. 94–105.
4. Борзиков В. В., Рукина Н. Н., Воробьева О. В., Кузнецов А. Н., Белова А. Н. Видеоанализ движений человека в клинической практике (обзор) // Современные технологии в медицине. 2015. Т. 7. № 4. С. 201–210. DOI: 10.17691/stm2015.7.4.26.
5. Шейко Г. Е., Белова А. Н., Рукина Н. Н., Короткова Н. Л. Возможности использования биомеханических систем захвата движений человека в медицинской реабилитации (обзор) // Физическая и реабилитационная медицина, медицинская реабилитация. 2022. Т. 4. № 3. С. 181–196. DOI: 10.36425/rehab109488.
6. Filippeschi A., Schmitz N., Miezal M., Bleser G., Ruffaldi E., Stricker D. Survey of Motion Tracking Methods Based on Inertial Sensors: A Focus on Upper Limb Human Motion // Sensors. 2017. Vol. 17, N 6. Article 1257. DOI: 10.3390/s17061257.
7. Welch G., Foxlin E. Motion Tracking: No Silver Bullet, but a Respectable Arsenal // IEEE Computer Graphics and Applications. 2002. Vol. 22, N 6. P. 24–38. DOI: 10.1109/MCG.2002.1046626.
8. Axis Neuron User Guide [электронный ресурс]. URL: <https://usermanual.wiki/Document/AxisUserGuideFinal0923.414981546.pdf> (дата обращения: 29.05.2026).
9. Caserman P., Garcia-Agundez A., Göbel S. A Survey of Full-Body Motion Reconstruction in Immersive Virtual Reality Applications // IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics. 2020. Vol. 26. N 10. P. 3089–3108. DOI: 10.1109/TVCG.2019.2912607.

Статья представлена заведующим кафедрой ЦТМ СПбГУТ, к.т.н., доцентом С. Л. Фёдоровым.

APPLICABILITY OF INERTIAL MOTION CAPTURE
OF A USER IN A TELEPRESENCE SYSTEM

Tatarenkov D. A., Fedotov D. D.

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

The paper considers a preliminary assessment of inertial motion capture for a telepresence system with a digital avatar. The experimental platform is based on the Perception Neuron 2.0 suit with thirty-two sensors and Axis Neuron software. During the tests, the user's movements were recorded by a fixed camera, while the skeletal model was captured from the screen. The recorded materials were used to estimate motion transmission latency, static stability, drift, repeatability of gestures and visible joint artifacts. The obtained results are not treated as a final metrological evaluation, but they show which parameters should be studied further when developing a telepresence prototype.

Key words: telepresence, inertial motion capture, digital avatar, virtual reality, Perception Neuron, latency, drift, virtual production, full-body tracking.

УДК 621.396.969

ГРНТИ 47.49.31

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ РАЗНОСТИ ВРЕМЕН ПРИХОДА СИГНАЛОВ LTE

Г. А. Фокин, Х. К. Хыя

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Современные исследования систем позиционирования часто требуют дорогостоящего специализированного оборудования, что ограничивает возможности проведения практических экспериментов. В качестве эффективной альтернативы в данной работе проведен эксперимент по оценке точности измерения разности времени прихода сигналов TDOA в сетях LTE с использованием технологии программно-конфигурируемого радио SDR на базе платформы USRP B210.

позиционирование, LTE, разность времени прихода сигналов, TDOA, MLE

Современные исследования в области беспроводной связи и позиционирования традиционно требуют использования дорогостоящих генераторов сигналов, анализаторов спектра и специализированных базовых станций (БС, BS – Base Station) [1]. Это существенно ограничивает возможность проведения практических экспериментов в учебных и научных лабораториях. Одним из решений данной проблемы является применение технологии программно-конфигурируемого радио (SDR – Software Defined Radio). SDR устройства обладают сравнительно низкой стоимостью, гибкой архитектурой и поддержкой современных стандартов связи [2, 3]. Благодаря этому они позволяют исследователям моделировать реальные телекоммуникационные системы с минимальными затратами [4]. Целью данной работы является экспериментальная оценка точности позиционирования в сетях LTE на основе измерения разности времени прихода сигналов (TDOA – Time Difference of Arrival) с использованием доступных SDR.

Для достижения поставленной цели была реализована экспериментальная система позиционирования на базе двух устройств USRP B210. Выбор данной платформы обусловлен ее способностью обеспечивать полосу пропускания до 56 МГц, что достаточно для корректной передачи и приема полных широкополосных сигналов стандарта LTE, а также широким диапазоном рабочих частот (от 70 МГц до 6 ГГц).

В основе предложенной архитектуры лежит использование технологии множественных входов и множественных выходов (MIMO – Multiple-Input Multiple-Output) USRP B210, в котором два передающих канала TX полностью синхронизированы на аппаратном уровне, выполняя роль двух БС, параллельно излучающих сигналы. При этом второе устройство USRP B210 выступает в роли пользовательского устройства (UE – User Equipment) – независимого приемника RX, выполняя захват и обработку реального радиосигнала после его прохождения через линию связи. Экспериментальный процесс расчета TDOA описан схемой на рис. 1.

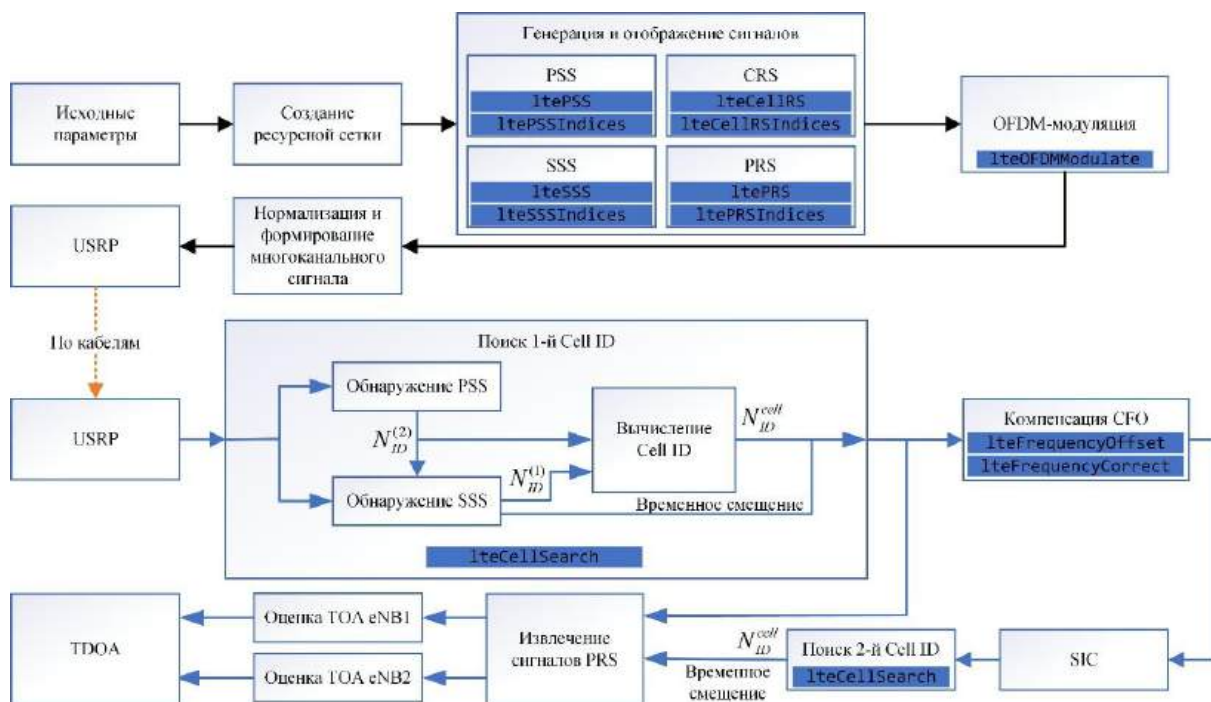


Рис. 1. Экспериментальный процесс расчета TDOA

Процесс генерации базовых сигналов LTE, включая первичный (PSS – Primary Synchronization Signal) и вторичный сигнал синхронизации (SSS – Secondary Synchronization Signal), опорный сигнал соты (CRS – Cell-Specific Reference Signal) и опорный сигнал позиционирования (PRS – Positioning Reference Signal), а также формирование соответствующих ресурсных сеток осуществляется в среде MATLAB с помощью встроенных функций LTE Toolbox [5]. На передающей стороне предварительно создаются сигналы с заданными параметрами LTE, после чего они модулируются на основе технологии ортогонального частотного мультиплексирования (OFDM – Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) и подаются на два синхронных канала передачи [6]. Для контроля одновременной работы обоих передающих трактов и обеспечения согласованности их запуска на стороне передат-

чика используется управляющая программа, реализованная на Python. Такая организация эксперимента позволяет обеспечить воспроизводимость результатов и исключить случайные временные рассогласования между каналами.

Передача сигналов осуществляется по двум коаксиальным кабелям в двух сценариях. В первом сценарии используются кабели одинаковой длины, что соответствует эталонному случаю, при котором время прихода сигналов в обоих трактах одинаково. Во втором сценарии длины кабелей различаются, и в результате один из сигналов приходит на приемную сторону с дополнительной временной задержкой. Именно это различие и используется для последующего определения искомой разности времени прихода сигналов, соответствующей разности длин кабелей.

На приемной стороне выполняется захват суммарного сигнала и его последующая цифровая обработка. Сначала производится поиск идентификатора соты (Cell ID), что позволяет выполнить грубую синхронизацию и определить положение полезного сигнала во временной области. Затем применяется метод последовательного подавления помех (SIC – Successive Interference Cancellation), с помощью которого поэтапно выделяются компоненты, соответствующие двум передающим каналам [6]. Это особенно важно в случае одновременного приема двух LTE сигналов в одной полосе частот, поскольку позволяет разделить их вклад и восстановить каждый тракт отдельно.

После выделения сигналов в среде MATLAB вычисляется взаимная корреляция с использованием функции `xcorr`. Положение корреляционного пика определяется в рамках метода максимального правдоподобия (MLE – Maximum Likelihood Estimation), поскольку именно точка наибольшей корреляции между принятым и опорным сигналами соответствует наиболее вероятной оценке времени прихода [7]. Разность между положениями двух корреляционных пиков интерпретируется как разность времени прихода сигналов в двух кабельных линиях. Далее эта временная разность преобразуется в разность длин кабелей с учетом скорости распространения сигнала в используемом коаксиальном тракте.

Экспериментальная установка представлена на рисунке 2.

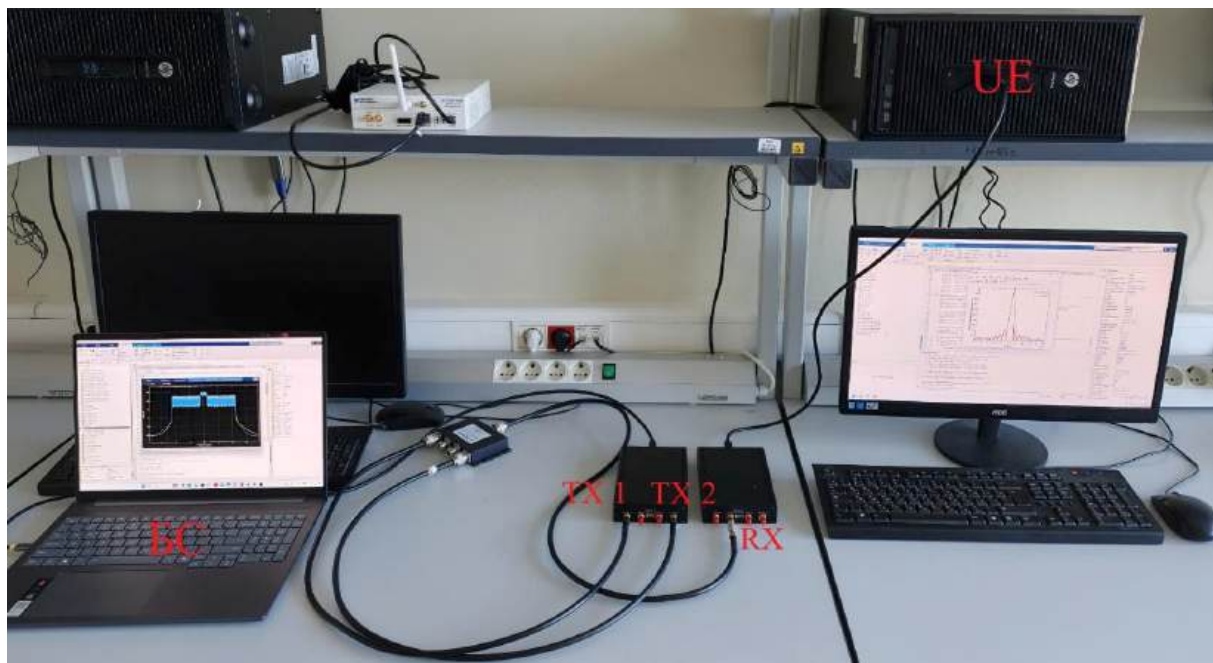
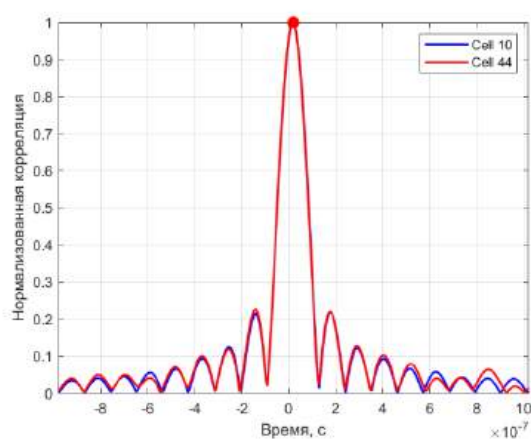


Рис. 2. Экспериментальная установка

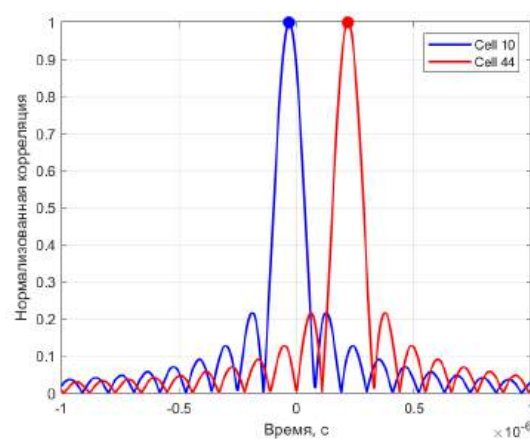
Результаты проведения эксперимента приведены в таблице 1 и на рисунке 3.

ТАБЛИЦА 1. Результаты проведения эксперимента

Ширина полосы сигнала, МГц	Истинная разность длин кабелей, м	Вычисленная разность длин кабелей, м
10	0	0
	49	49,805



а)



б)

Рис. 3. Взаимно-корреляционные функции принятых сигналов при:
а) одинаковой и б) разной длине кабелей

Полученные результаты показали, что при использовании кабелей различной длины вычисленная разность расстояний близка к реальному значению, однако сохраняется небольшое отклонение. Основными причинами данной погрешности являются неточность задания скорости распространения электромагнитной волны в кабеле и ограниченное разрешение по дальности, обусловленное шириной полосы сигнала (19,53 м при ширине полосы 10 МГц). На практике коэффициент укорочения зависит от типа линии, конструкции диэлектрика, частотного диапазона и технологических особенностей конкретного кабеля, вследствие чего его номинальное значение может отличаться от фактического.

Несмотря на указанные ограничения, проведенный эксперимент подтвердил высокую эффективность применения SDR для решения исследовательских задач в учебных и научных лабораториях [8]. Использование доступного оборудования позволяет выполнять моделирование работы сетей LTE, исследовать алгоритмы синхронизации, оценки временных задержек и обработки многоканальных сигналов без применения подсистемы синхронизации.

Результаты работы демонстрируют практическую применимость предложенного подхода для контроля степени синхронизации между передающими станциями. Это особенно важно при последующем построении более сложных экспериментальных моделей, включающих многолучевое распространение радиоволн. Таким образом, SDR может служить удобной и экономически эффективной платформой для дальнейших исследований в области беспроводной связи, позиционирования и сетевого взаимодействия базовых станций.

Список используемых источников

1. del Peral-Rosado J. A. et al. Comparative results analysis on positioning with real LTE signals and low-cost hardware platforms // 2014 7th ESA Workshop on Satellite Navigation Technologies and European Workshop on GNSS Signals and Signal Processing (NAVITEC). Noordwijk, Netherlands, 2014. P. 1–8. DOI: 10.1109/NAVITEC.2014.7045148.
2. Shamaei K., Kassas Z. M. LTE receiver design and multipath analysis for navigation in urban environments // NAVIGATION. 2018. Vol. 65. P. 655–675. DOI: 10.1002/navi.272.
3. Liu Z., Chen L., Zhou X., Shen N., Chen R. Multipath tracking with LTE signals for accurate TOA estimation in the application of indoor positioning // Geo-spatial Information Science. 2023. Vol. 26, № 1. P. 31–43. DOI: 10.1080/10095020.2022.2108344.
4. Driusso M., Marshall C., Sabathy M., Knutti F., Mathis H., Babich F. Vehicular Position Tracking Using LTE Signals // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2017. Vol. 66, № 4. P. 3376–3391.

5. Фокин Г. А., Шеремет Н. В., Рютин К. Е., Гришин И. В. Лабораторные испытания SDR демонстратора передачи и приема сигнала LTE с двух антенн // НТК Санкт-Петербургского НТО РЭС. 2024. № 1 (79). С. 170–173.

6. Фокин Г. А., Шеремет Н. В. Постановка задачи экспериментальной апробации многоантенных систем на основе программно-конфигурируемого радио // Подготовка профессиональных кадров в магистратуре в эпоху цифровой трансформации. 2025. С. 125–131.

7. Хыя Х. К., Фокин Г. А. Комплексное исследование точности позиционирования устройств в сетях LTE в условиях прямой видимости // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2026. Т. 29, № 1. С. 55–75. DOI: 10.32603/1993-8985-2026-29-1-55-75

8. Фокин Г. А. Технологии программно-конфигурируемого радио. М.: Горячая Линия – Телеком, 2019. 316 с.

EXPERIMENTAL EVALUATION OF TIME DIFFERENCE OF ARRIVAL MEASUREMENT ACCURACY FOR LTE SIGNALS

Hua H. C., Fokin G.

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

Contemporary research on positioning systems frequently necessitates costly specialized equipment, thereby constraining the feasibility of empirical studies. As a viable alternative, this paper presents an investigation to assess the accuracy of Time Difference of Arrival (TDOA) measurements within LTE networks. The proposed approach leverages Software-Defined Radio (SDR) technology, specifically utilizing the USRP B210 platform.

Key words: Positioning, LTE, time difference of arrival, TDOA, MLE

РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ И РОБОТОТЕХНИКА

УДК 621.396

ГРНТИ 47.14.17

О ПРОБЛЕМАХ, ВОЗНИКАЮЩИХ В РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ, СОПРОВОЖДАЮЩИХ МАЛОВЫСОТНЫЕ ЛЕТАТЕЛЬНЫЕ АППАРАТЫ В УСЛОВИЯХ МНОГОЛУЧЕВОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

В. А. Авдяков

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Рассмотрены проблемы обеспечения устойчивого обнаружения летательные аппаратов на малых высотах в условиях многолучевого распространения электромагнитных волн. Принципиальные трудности сопровождения таких воздушных объектов на малых углах места связаны с явлением многолучевого распространения от подстилающей поверхности. Представлены основные результаты моделирования, полученные во время выполнения исследований.

низколетящий летательный аппарат, многолучевое распространение волн, помехи, шумы

В настоящее время создается большое количество беспилотных летающих аппаратов различных модификаций и крылатых ракет диапазон применения которых лежит в пределах от 50 метров и выше. Проблема обнаружения и сопровождения таких низколетящих летательных аппаратов (НЛА) относится к числу наиболее актуальных проблем радиолокации. Принципиальные трудности сопровождения на малых углах места связаны с явлением многолучевого распространения. В зависимости от типа поверхности и угла места НЛА в сигнале многолучевого распространения может преобладать зеркальная или диффузная составляющая. В соответствии с этим в некоторой степени меняются условия сопровождения. В любом случае задача сопровождения сводится к многоточечной ситуации, при которой пеленгация

осуществляется в присутствии изображения НЛА, формируемого переотражениями или рассеянными подстилающей поверхностью сигналами.

Как показывает практический опыт радиолокации таких воздушных объектов [1-5], сопровождение на малых углах места осуществляется со значительными ошибками, приводящими с высокой вероятностью к срыву углового сопровождения.

Наличие принципиальных трудностей сопровождения НЛА, а также их малая дальность радиовидимости привела, как это следует из зарубежных публикаций, к активному их применению в местах, где необходима малая заметность [6].

В настоящее время многие из существующих радиолокационных станций (РЛС) имеют минимальную высоту обнаружения $H_{\text{п}} \geq 50$ м. В этих условиях обеспечение устойчивого обнаружения и сопровождения НЛА стало одной из наиболее актуальных проблем радиолокации.

Анализ материалов зарубежных публикаций показал, что, начиная с 70-80-х годов разработчиками РЛС ведущих фирм был выполнен большой объем работ по исследованию и созданию систем сопровождения НЛА [1].

НЛА и его зеркальное изображение образуют классическую схему двухточечного воздушного объекта по угломестной координате. Амплитуда сигнала изображения определяется произведением коэффициента отражения Френеля, коэффициента поглощения растениями и коэффициента зеркального рассеяния [5]. Показано, что искажения фазового фронта, сформированного таким воздушным объектом, обуславливают возникновение ошибки по угломестной координате в пеленгаторе любого типа [1, 5].

Если прямой сигнал превышает сигнал многолучевого распространения, то ошибка углового сопровождения (СКО) описывается обычным выражением с заменой отношения сигнал-шум на отношение сигнал-помеха в разностном канале S/I_{Δ} [7].

$$\sigma = \frac{\theta_s}{\mu \sqrt{(S/I_{\Delta}) n_c}}, \quad (1)$$

где θ_s – ширина ДН в угломестной плоскости, μ – крутизна пеленгационной характеристики, n_c – эффективное число независимых выборок.

Величина, обратная отношению сигнал-помеха в разностном канале, рассчитывается путем интегрирования распределения сигнала многолучевого распространения в четырехмерном элементе разрешения РЛС.

В связи с созданием новых и совершенствованием существующих РЛС рассмотренные данные вопросы приобретают важное значение. Наиболее важным при этом является обнаружение радиолокационными средствами

на более ранних стадиях развития событий. Это представляет в настоящее время весьма сложную проблему.

Дополнительные проблемы возникают в связи с тем, что обнаружение и оценивание параметров приходится вести при наличии естественных (пассивных) и искусственных (активных) помех. Наиболее эффективным средством подавления РЛС является применение низколетящих постановщиков активных помех, так как создаваемые ими помеховые сигналы в результате многолучевого распространения «размножаются» и подавляют РЛС. Известно, что для подавления сигналов помех необходимо, чтобы выполнялось неравенство

$$n < N, \quad (2)$$

где n – число постановщиков активных помех, имеющих различные угломестные координаты, N – число пространственных каналов обработки. Нетрудно посчитать, что при $N = 100$, $n \leq 99$. В случае, когда число лучей $p = 10$, число постановщиков не должно превышать 9.

Запаздывание по дальности сигнала антипода относительно прямого сигнала определяется выражением

$$|\Delta D| = \frac{H}{\sin \rho} (1 - \cos \rho), \quad (3)$$

где H – высота антенны, ρ – угол места. На рис. 1, показана зависимость $\Delta D = f(\rho)$.

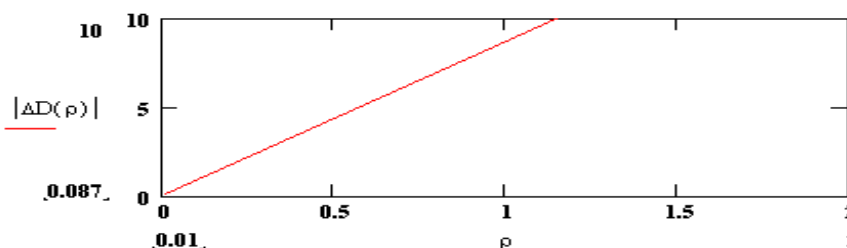


Рис. 1. Зависимость запаздывания по дальности сигнала антипода относительно прямого сигнала

Если считать, что H и ΔD заданы в длинах волн, для разрешения по времени двух сигналов, следующих с интервалом 5λ , необходимо иметь относительную ширину полосы радиолокационного сигнала, примерно равную 20 %. При меньших углах места временное разрешение по критерию Рэлея будет в принципе технически нереализуемым. Поясним это на примерах.

На рис. 2 приведен вид 3-х разрешимых по критерию Рэлея сигналов длительностью 5λ . Задержка между сигналами одинакова и равна 5λ . На

рис. 3 показаны те же 3 сигнала, но при отношении сигнал-шум меньшем на два порядка. На рис. 4 – рис. 5 показаны результаты согласованной фильтрации (СФ) сигналов, изображенных на рис. 2 – рис. 3.

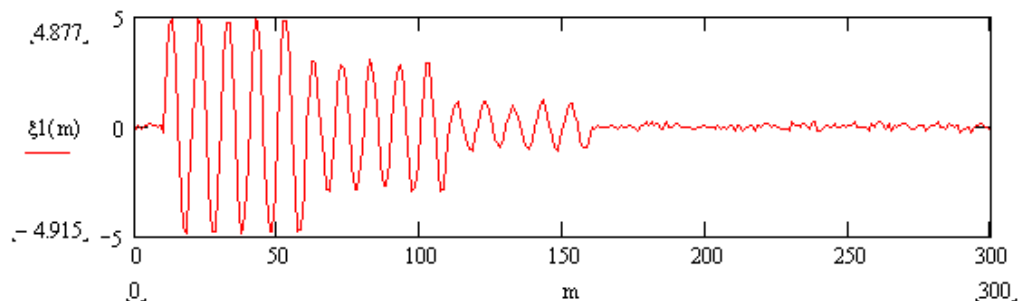


Рис. 2. Вид 3-х разрешимых по критерию Рэлея сигналов длительностью 5λ

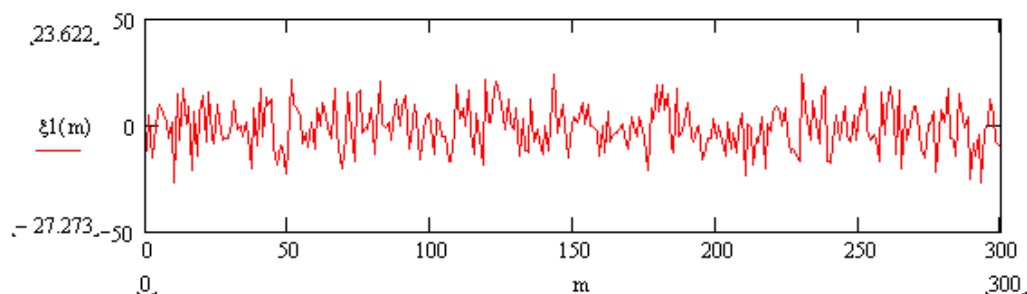


Рис. 3. Вид 3-х разрешимых по критерию Рэлея сигналов длительностью 5λ с отношением сигнал-шум уменьшенном на два порядка

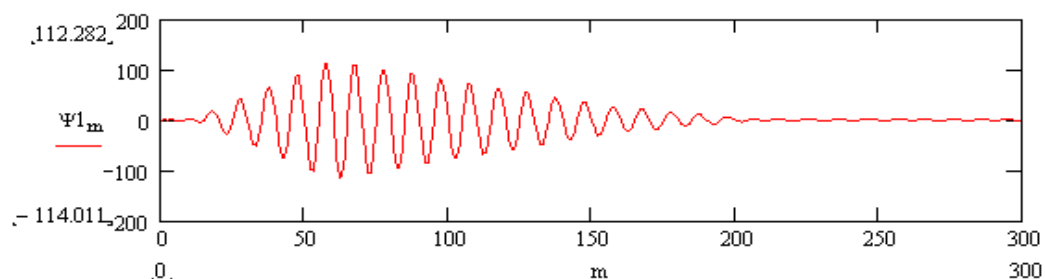


Рис. 4 Результат СФ сигналов, изображенных на рис. 2.

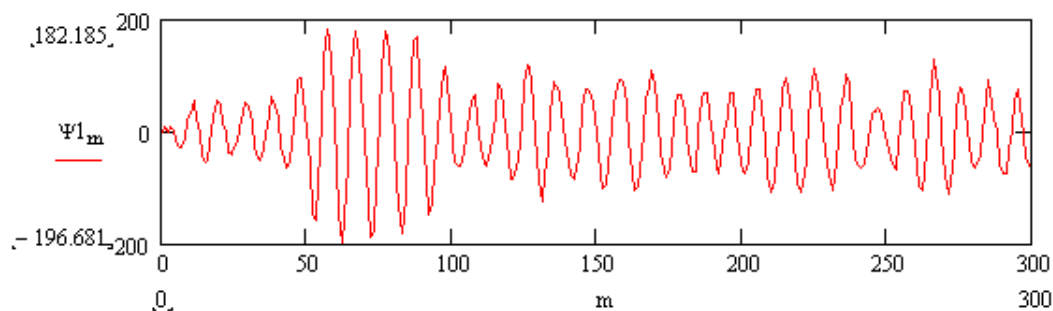


Рис. 5. Результат СФ сигналов, изображенных на рис. 4

В случае 3-х неразрешимых по критерию Рэлея сигналов, представленном на рис. 6, известными методами не удастся определить число лучей и параметры сигналов. Реализация представлена на рис. 7. Результат СФ – на рис. 8. Из графиков следует, что наблюдается и существенная ошибка в определении дальности.

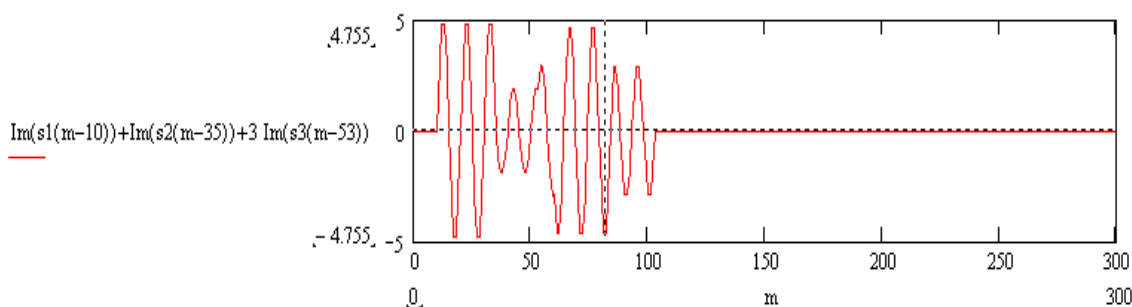


Рис. 6 Случай 3-х неразрешимых по критерию Рэлея сигналов

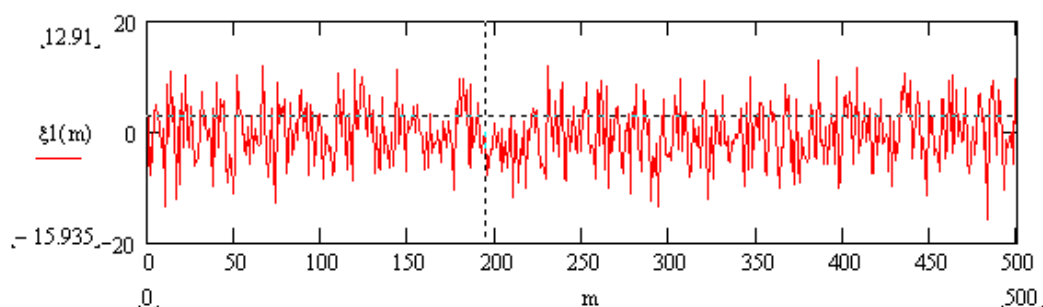


Рис. 7. Реализация определения сигналов

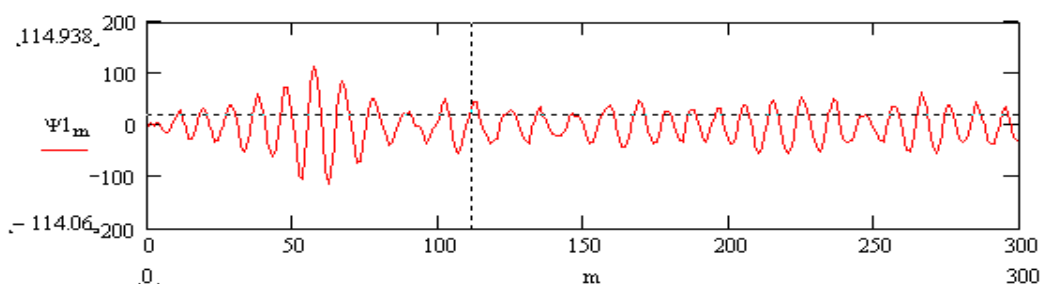


Рис. 8. Результат СФ

Выводы

Автор данной статьи рассмотрел в данной работе задачу обнаружения и оценивания параметров прямого сигнала на фоне активных и пассивных помех в условиях многолучевого распространения. Предлагается подобные задачи рассматривать и решать – как задачу полного разрешения сигналов (обнаружения и оценивания числа и параметров множественных летательных объектов). Ее отличительным признаком является малое отношение

сигнал – шум. Поэтому она должна ставиться и решаться как задача стохастического полного разрешения сигналов [8].

В качестве моделей узкополосных сигналов помимо отмеченной выше задачи обнаружения медленно-флуктуирующего сигнала применима модель сигнала от НЛО с доплеровским рассеянием, обычно присущая вертолетам, самолетам с турбореактивным и винтовым двигателем и ряду других моделей.

Расширение полосы пропускания зондирующего сигнала приводит к тому, что при малых углах места и сигналах менее 0,5 мкс изменяются плотности распределения вероятностей сигналов, помех и шумов. Как показали исследования, плотности распределения вероятностей флуктуаций сигналов и помех, поступающих на входы РЛС сопровождения, подчиняются вейбулловскому, логарифмически нормальному, а также полигауссовскому законам распределения вероятностей.

Поэтому для получения оптимальных результатов обработки сигналов необходимо знать и правильно использовать плотности распределения вероятностей сигналов и помех, принимаемых РЛС. Это означает, что необходимо иметь либо набор оптимальных приемных устройств для всевозможных комбинаций вероятностных распределений и выбирать требуемый тип такого устройства, либо строить адаптивное устройство, инвариантное к виду вероятностных распределений.

Автор данной статьи в рамках настоящей работы в качестве зондирующих сигналов рассматривал только узкополосные сигналы.

Список используемых источников

1. Андреева Т. М. Методы помехозащиты угломерных каналов и каналов селекции целей РЛС автосопровождения (Обзор состояния и тенденции развития). Обзорная информация. Серия: электроника и приборостроение. М.: ВНИИПИ, 1988. 73 с.
2. Papa R. I. et al. Multipath effects on an azimuthal monopulse system. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. July 1983, AES-19. № 4. PP. 585-597.
3. Barton D. K. Low-altitude tracking over rough surfaces. 1Theoretical predictions. «EASCON-79, Rec.IEEE Electron. And Aerospace Systems. Conf. Arlington, Va., 1978», N. Y. 1979. PP. 2224-234.
4. Barton D. K. Radar multipath theory and experimental data. «IEEE Radar-77». London, England, Oct.25-28, 1977. PP. 308-312.
5. Бартон Д., Вард Г. Справочник по радиолокационным измерениям. М.: Сов. Радио, 1976. 392 с.
6. Van Brant L. B. Applied ECM c1 1978, Engineering, USA. 973p.
7. Дымова А. И., Альбац М. Е., Бонч-Бруевич А. М. Радиотехнические системы. М.: Сов. Радио, 1975. 439 с.

8. Давыдов В. С., Лукошкин А. П., Шаталов А. А., Ястребков А. Б. / Под ред. А. П. Лукошкина, А. А. Шаталова, А. Б. Ястребкова. СПб.: Янис, 1993. 280 с.

**ON THE PROBLEMS ARISING IN A RADAR SYSTEM ACCOMPANYING
A LOW-ALTITUDE AIRCRAFT UNDER CONDITIONS OF MULTIPATH
PROPAGATION OF ELECTROMAGNETIC WAVES**

Avdyakov V.

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

The paper addresses the challenges of ensuring reliable detection of aircraft at low altitudes under conditions of multipath propagation of electromagnetic waves. The fundamental difficulties in tracking such aerial objects at low elevation angles are associated with the multipath propagation phenomenon caused by reflections from the underlying surface. The main simulation results obtained during the research are presented.

Key words: low-flying aircraft, multipath waves, interference, noise

УДК 004.946
ГРНТИ 28.17.33

АРХИТЕКТУРА ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННЫХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ

С. В. Акимов, Г. В. Верхова

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Рассмотрены проблемы децентрализованного геоинформационного моделирования, соответствующего концепции Web 3.0 и Web 4.0, а также подходы к интеллектуальной трансформации традиционных геоинформационных моделей. Предложена архитектура децентрализованных геоинформационных моделей, которая получена в результате интеллектуальной трансформации многоаспектных моделей природно-техногенных геосистем. Рассмотрены технологии, которые используются в интеллектуальной трансформации децентрализованных многоаспектных геоинформационных моделей.

интеллектуальная трансформация геоинформационных моделей, многоаспектные геоинформационные модели, киберфизическая геосреда, природно-техногенная геосистема, децентрализованное многоаспектного геоинформационное моделирование

Учитывая тенденцию к децентрализации и интеллектуализации современных информационных систем, продиктованные эволюцией всемирной паутины по направлению к Web 3.0 и Web 4.0 [1-2], необходима трансформация геоинформационных систем, онлайн-геосервисов и инфраструктуры пространственных данных в децентрализованную кибернетическую киберсреду, являющуюся частью единой киберфизической среды постиндустриального общества. Учитывая, что такая трансформация невозможно в рамках существующих подходов, необходимо создание и развитие новых архитектурных решений для децентрализованных интеллектуальных геоинформационных моделей, которые будут положены в основу кибернетической геосреды.

Интеллектуальная геоинформационная модель природно-техногенной геосистемы состоит из комплексной многоаспектной геоинформационной модели [3-4] и блока интеллектуального моделирования. Блок интеллектуального моделирования состоит из двух компонентов: первичная интеллектуальная модель и вторичная интеллектуальная модель (рис. 1).

Комплексная многоаспектная геоинформационная модель содержит структурированную мультимодальную информацию о природно-техноген-

ной геосистеме. Данная модель представляет собой классическую базу знаний о геосистеме.

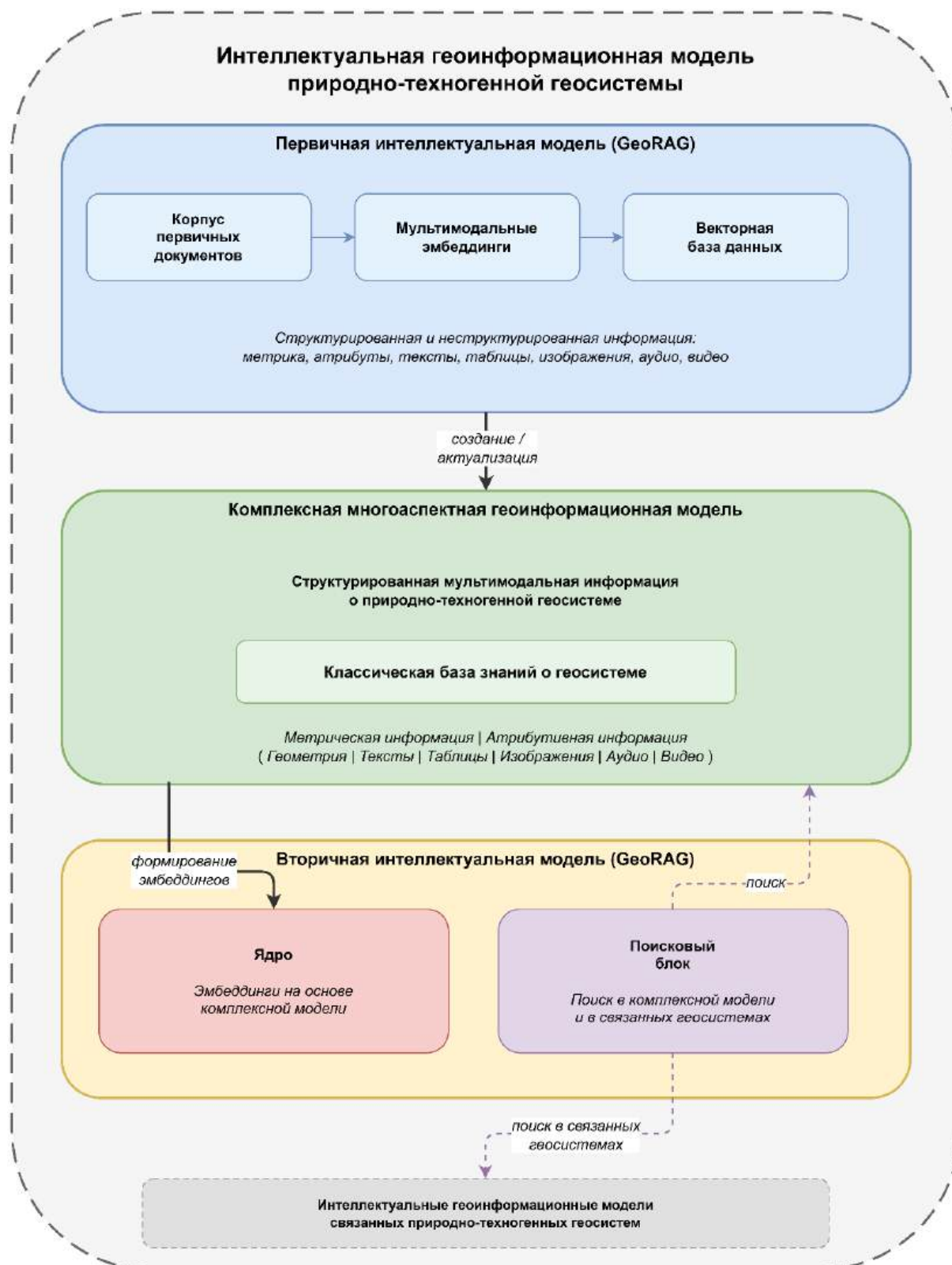


Рис. 1. Архитектура интеллектуальной геоинформационной модели природно-техногенной геосистемы

Первичная интеллектуальная модель представляет собой GeoRAG, основу которого содержит корпус первичных документов, содержащих метрическую и атрибутивную информацию, как структурированную, так и представленную в виде тестов, таблиц, изображений, аудио и видео. Данная информация преобразуется в мультимодальные эмбединги, которые хранятся в векторной базе данных. На основе информации, хранящейся в первичной интеллектуальной модели, создается / актуализируется многоаспектная комплексная геоинформационная модель.

Вторичная интеллектуальная модель состоит из ядра и поискового блока. Ядро вторичной интеллектуальной модели имеет структуру, аналогичную первичной интеллектуальной модели, только эмбединги формируются на базе информации, хранящейся в комплексной многоаспектной модели. Как и первичная модель, вторичная модель представляет собой GeoRAG. Поисковый блок обеспечивает поиск информации, хранящийся как в комплексной многоаспектной модели, так и в интеллектуальных геоинформационных моделях связанных природно-техногенных геосистем.

Предложенная модель обеспечивает эффективный интеллектуальный поиск по информации, хранящейся в локальных геоинформационных моделях отдельных природно-техногенных геосистем. Рассмотрим два сценария. Первый сценарий не предполагает использования реплик векторных баз данных на узле модели родительской геосистемы. В этом случае запрос направляется головному узлу, который далее транслирует его дочерним узлам, которые, в свою очередь, могут его перенаправить своим дочерним узлам. В случае нахождения геосистемы, удовлетворяющей условиям запроса, возвращается ссылка на данную модель с выделением того аспекта, к который удовлетворяет условиям поиска (рис. 2). В общем случае возможно нахождение нескольких географических объектов, удовлетворяющих условиями поиска, или несколько аспектов. В таком случае будут возвращены ссылки на все объекты, проранжированные по релевантности условиям запроса.

Достоинством рассмотренного сценария является минимизация в кибернетической геосреде избыточной информации, так как каждый узел хранит только информацию, определяемую своим контекстом (например, модель города хранит только информацию, существенную для города в целом, а также о главных подсистемах (например, районах, реках, крупных магистралях), представленных прокси-моделями). Недостатком является необходимость трансляции запроса дочерним объектам, что требует дополни-

тельной нагрузки на вычислительные ресурсы узлов, на которых они запущены, а также увеличение времени выполнения запроса. Ситуация несколько улучшается, если из запроса можно вычленить дочерние модели, в которых целевые объекты находятся не могут (левая ветвь дерева).

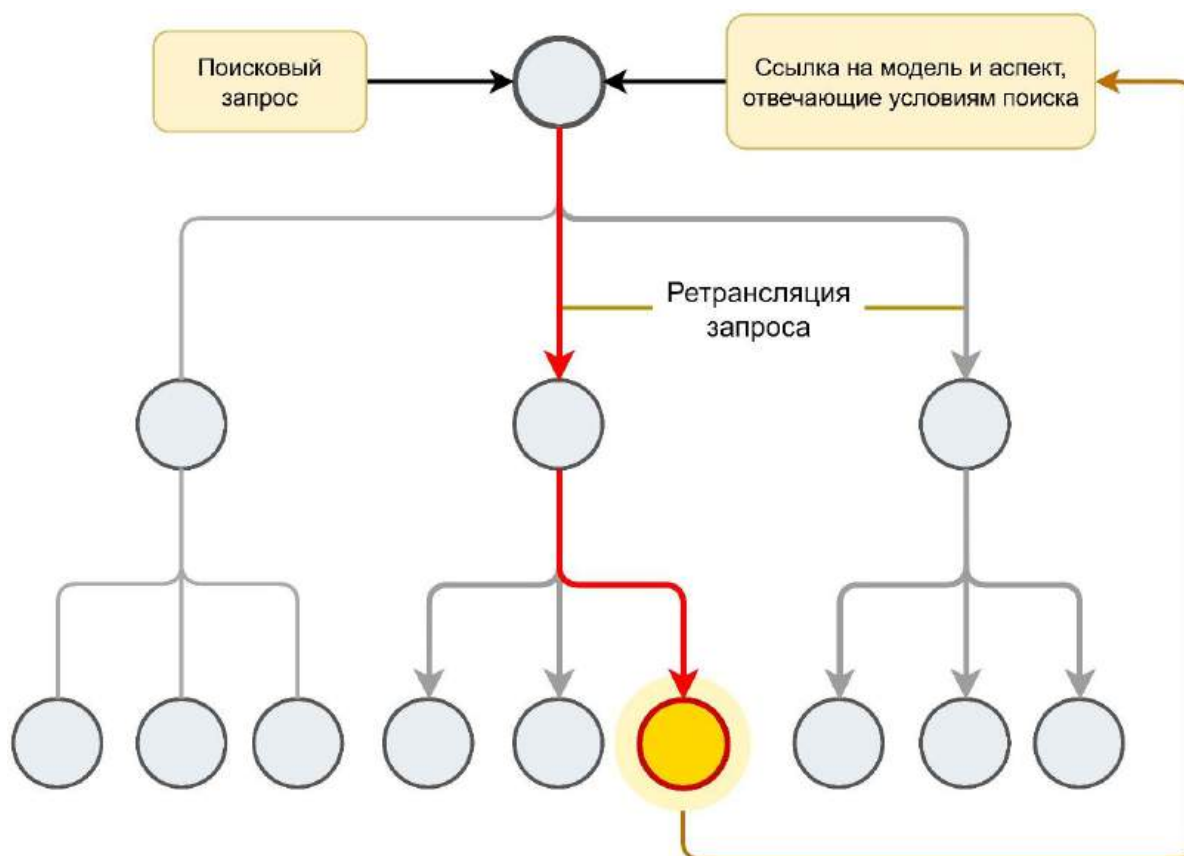


Рис. 2. Поиск информации в децентрализованной кибернетической геосреде без реплики децентрализованной базы данных

Другим сценарием является наличие на головных узлах реплик баз данных моделей дочерних геосистем (рис. 3). В данном случае требуемые объекты и аспекты будут найдены на головном узле, после чего на будут сгенерированы на них ссылки. Достоинствами данного сценария являются:

- высокая скорость нахождения результата;
- отсутствие необходимости транслировать запросы моделям дочерних геосистем, и как результат – снижения вычислительной нагрузки на другие узлы кибернетической геосреды;
- повышение степени релевантности результатов поиска, ввиду того что все поисковые операции осуществляются в одной базе данных.

К недостаткам следует отнести:

- повышение требований к вычислительным ресурсам узлов, содержащих реплики баз данных дочерних моделей, которые будут увеличиваться с укрупнением уровня моделируемых геосистем, и как следствие, к повышению объема и числа баз данных дочерних геосистем, которые необходимо реплицировать;
- некоторое снижение степени децентрализации и усложнения поддержки суверенной идентичности (Self-Sovereign Identity, SSI).

Возможны гибридные сценарии, при которых реплицируется не вся информация, а только легковесные суммаризации (эмбединги высокого уровня).

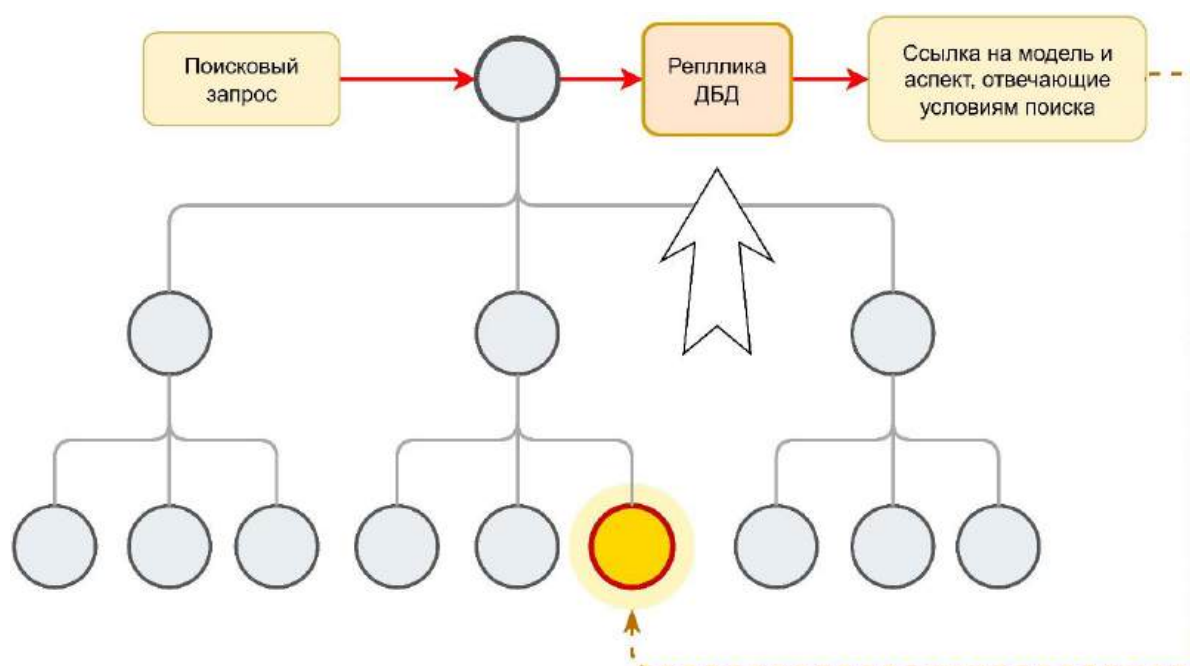


Рис. 3. Поиск информации в децентрализованной кибернетической геосреде с репликой баз данных дочерних геосистем

Предложенный в работе подход к формированию децентрализованных интеллектуальных геоинформационных моделей обеспечит стратегию постепенного формирования киберфизической геосреды, полностью соответствующую современным тенденциям развития кибернетических технологий постиндустриального общества [5], снижая возможности кибербалканизации.

Публикация осуществляется в рамках проекта «Интеллектуальная трансформация курса геоинформационного моделирования», реализуемого победителем грантового конкурса для преподавателей 2025/2026 Стипендиальной программы Владимира Потанина.

Список используемых источников

1. Заикина О. П., Хафизов Д. Р., Иванов Е. Е. Исследование рынка труда Web3 // Современные проблемы обеспечения безопасности человека в условиях развития гражданского общества. Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. 2023. С. 121-126.
2. Мальсагова Р. Г., Дугаев М. В., Ефремова С. А. Блокчейн, криптовалюта, NFT, Web 3.0 и smart-контракт как технологии развития и масштабирования метавселенных // Инновации и инвестиции. 2023. № 11. С. 199-207.
3. Акимов С. В., Меткин Н. П. Архитектура среды многоаспектного моделирования для автоматизации решения задач исследования, проектирования и управления // Вопросы радиоэлектроники. 2013. Т. 1. № 1. С. 32-40.
4. Верхова Г. В., Акимов С. В., Присяжнюк А. С. Метод многоаспектного геоинформационного моделирования географического района // Информация и космос. 2021. № 4. С. 123-129.
5. La Cava L., Greco S., Tagarelli A. Understanding the growth of the Fediverse through the lens of Mastodon // Applied Network Science. 2021. Т. 6. № 1. С. 64.

ARCHITECTURE OF DECENTRALIZED INTELLIGENT GEOINFORMATION MODELS

Akimov S., Verkhova G.

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

This article examines the challenges of decentralized geoinformation modeling, consistent with Web 3.0 and Web 4.0 concepts, as well as approaches to the intelligent transformation of traditional geoinformation models. An architecture for decentralized geoinformation models is proposed, resulting from the intelligent transformation of multifaceted models of natural and man-made geosystems. Technologies used in the intelligent transformation of decentralized multifaceted geoinformation models are discussed.

Key words: *intelligent transformation of geoinformation models, multi-aspect geoinformation models, cyberphysical geoenvironment, natural-technogenic geosystem, decentralized multi-aspect geoinformation modeling*

УДК 621.376.4
ГРНТИ 49.43.29

ТЕХНИКИ МОДУЛЯЦИИ В КАНАЛЕ ДЕКАМЕТРОВОЙ РАДИОСВЯЗИ

Н. В. Барышников, С. Г. Вологин, А. Н. Путилин

Публичное акционерное общество «Информационные телекоммуникационные технологии»

Предлагаются к рассмотрению пути развития техник модуляции в канале декаметровый радиосвязи. Рассмотрены недостатки и достоинства используемых в настоящее время техник модуляции. В качестве путей совершенствования техник модуляции предложено применение клиппирования передаваемого сигнала, использование неортогонального частотного разделения каналов, временное смещение посылок соседних каналов в параллельном модеме, переход к модуляции Single Carrier – Frequency Division Multiple Access. Выигрыш от использования предлагаемых техник оценивается как по изменению границ помехоустойчивости реализованных модемов, так и по простоте спектральной эффективности предлагаемых техник модуляции.

модуляция, декаметровый диапазон, не ортогональное разделение каналов

Канал декаметровой радиосвязи дает уникальную возможность передачи данных на большие расстояния, до нескольких тысяч километров. В то же время он является наиболее сложным для реализации в нем передачи данных. Характеристики канала наиболее полно описаны в Рекомендации ITU-R F.1480. Он характеризуется многолучевостью (разность хода лучей до 10 мс), растеканием спектра сигнала (до 3 Гц), общими и селективными замираниями (скорость до 90 замираний в минуту), низкими отношениями сигнал/шум (ниже -6 дБ).

Базовыми техниками модуляции являются последовательная и параллельная передача посылок сигнала. Длина элементарной гармонической посылки при умножении на ширину ее спектра по нулям первой гармоники всегда дает единицу. Последовательная передача данных подразумевает формирование коротких посылок с растеканием спектра на всю разрешенную полосу и, следовательно, использует один тональный сигнал (single tone – ST). Параллельная передача подразумевает передачу длинных посылок, занимающих часть разрешенной полосы и использующую многотональный сигнал. Эта техника получила название Orthogonal frequency-division multiplexing (OFDM). Скорости передачи данных при этом равны.

Последовательная передача получила развитие в Куйбышевском электротехническом институте связи (КЭИС), а параллельная – в Ленинград-

ском электротехническом институте связи (ЛЭИС) им. проф. М. А. Бонч – Бруевича, см. [1, 2]. В стандарте Министерства обороны США [3] описан один низкоскоростной модем с частотной модуляцией, один последовательный модем и два параллельных модема – 16 и 39 тональный.

В таблице 1 представлены достоинства и недостатки двух базовых классов модуляции для канала тональной частоты (КТЧ) – 0,3-3,4 кГц.

ТАБЛИЦА 1. Достоинства и недостатки двух базовых классов модуляции

Характеристика	OFDM	ST
Длительность посылки в КТЧ, мс	10	0,333
Защитный интервал, мс	2,5	отсутствует
Количество каналов в КТЧ	30	1
Количество отсчетов на посылку	120	4
FFT	120x30	4x1
Тестовые импульсы, %	отсутствуют	до 33
Период подстройки эквалайзера	отсутствует	20 мс
Пикфактор, раз	3.2	1.4
Динамический диапазон, дБ	10,1	2,9
Скорость в КТЧ с замираниями, Кб/с	4,8	4,8
Помехоустойчивость	10-4	$5 \cdot 10^{-3}$

Основным достоинством последовательного модема является минимальный пикфактор и, следовательно, высокая энергетическая эффективность. Недостаток – необходимость выравнивания сигнала перед демодуляцией. Основное достоинство параллельного модема – устойчивость к замираниям. Недостаток – высокий пикфактор.

Основную проблему OFDM модуляции может помочь решить обрезание сигнала по амплитуде сигнала при его формировании. Это техника клиппирования. Она исследована в работе [4]. Клиппирование вызывает рост помех неортогональности, но поднимает мощность сигнала. Поэтому каждому значению SNR на входе приемника соответствует свой оптимальный уровень клиппирования. При высоких отношениях SNR клиппирование не имеет смысла и приводит к снижению помехоустойчивости. Потенциальный выигрыш составляет до 5 дБ. Так, например в модеме «Оникс» ПАО «Интелтех» скорость 2,4 Кб/с обеспечивается при $SNR > 6$ дБ, с клиппированием – при $SNR > 1$ дБ. При низких SNR оптимальный уровень клиппи-

рования находится в диапазоне 1,75-2,75 от средней амплитуды сигнала. Реализация динамического вычисления оптимального уровня клиппирования требует введения в состав демодулятора блока текущей оценки SNR. Это создает потенциальную возможность постановки оптимизированного уровня помех для такого модема.

Другим способом повышения эффективности OFDM является использование сигналов с управляемой межсимвольной интерференцией (МСИ). Они имеют скорость следования посылок выше границы Найквиста (Faster than Nyquist, FTN), теоретического предела пропускной способности канала при ширине полосы пропускания F и числе бит в посылке M : $C = 2F \log_2 M$. Мазо [5] было показано, что при увеличении в $1/k$ раз скорости следования символов евклидово расстояние не изменяется, если k находится в интервале $[0,8...1]$. Это дает возможность повышения спектральной эффективности на 25 %, см. [6]. Простейший вариант реализации – уменьшение разнесения подканалов OFDM с нарушением ортогональности до появления МСИ с уровнем порядка -30 дБ относительно уровня входного сигнала. Его минимальное значение известно для любого вида приемника, поэтому данная модификация техники модуляции не требует адаптивной подстройки коэффициента сближения подканалов k . Для техники модуляции ST сигналов этот подход приводит к использованию сигналов с огибающей вида $\sin(x)/x$ (для OFDM такой вид имеет АЧХ) с временным наложением соседних посылок.

Для уменьшения МСИ в модемах OFDM при формировании посылок используется огибающая вида корень квадратный из приподнятого косинуса (root raised cosine, RRC). При переходе от одной посылки к другой появляются частотно-временные области, свободные от излучаемого сигнала. Следовательно, дополнительный выигрыш может быть обеспечен за счет «шахматного» временного смещения посылок соседних каналов. Такая техника формирования сигналов используется в LTE, однако при пакетной передаче она приводит к увеличению слота на половину длины посылки. Приблизительная оценка дополнительного увеличения спектральной эффективности – 7 %. Это решение можно совместить с техникой FTN.

Решить проблему низкой энергетической эффективности сигнальной конструкции позволяет техника SC-FDMA (Single Carrier – Frequency Division Multiple Access) [7]. После формирования сигнала OFDM он подвергается дискретному преобразованию Фурье, что дает ему свойства сигнала ST. К полученному единому сигналу добавляется защитный интервал и в таком виде он передается в канал. На приеме выполняется обратное преобразование. Сохраняя свойства OFDM, сигнал имеет пикфактор ST. Альтернативное название технологии – распределенная OFDM с дискретным

преобразованием Фурье (DFT-SOFDM – Discrete Fourier Transform Spread OFDM). Преимущества технологии: улучшение энергоэффективности, устойчивость к замираниям, которые «рвут» только часть посылки. Выигрыш от применения данной техники модуляции составит 7,2 дБ (см. Таблицу 1), что это эквивалентно увеличению скорости передачи данных в 2.4 раза при сохранении SNR.

Потенциально возможно использование в декаметровом канале не ортогональной SC-FDMA. Результаты подобных исследований на настоящее время неизвестны. Перечисленные техники модуляции только частично изучены. В настоящее время в отечественных серийных модемах декаметровой радиосвязи они не используются.

Список используемых источников

1. Николаев Б. И. Теория и методы последовательной передачи дискретных сообщений по непрерывным каналам с памятью, Москва, Радио и связь, 1988. 264 с.
2. Окунев Ю. Б. Теория фазоразностной модуляции, Москва, Связь, 1979. 215 с.
- MIL-STD-188-110B Interoperability and performance standards for data modems, Appendix D: HF data modem wave forms for since contiguous bandwidth up to 48 kHz, Department of Defense, 2000.
3. Бобровский В. И. Путилин А. Н., Скворцов А. К. Повышение эффективности OFDM на основе клиппирования // Техника средств связи, № 2 (146), 2019, С. 46-50.
4. Mazo J. E. Faster than Nyquist signaling // Bell System Technical Journal, The. 1975. Vol. 54, Issue: 8. PP. 1451-1462.
5. Гельгор А. Л., Горлов А. И., Попов Е.А. Преодоление «барьера» Найквиста при использовании одночастотных неортогональных многокомпонентных сигналов // Радиотехника. 2015. N 1. С. 32-49.
6. Бакулин М. Г., Крейнделин В.Б., Шлома А. М., Шумов А. П. Технология OFDM, Москва, Горячая линия – Телеком, 2024. 352 с.

MODULATION TECHNIQUES IN A DECAMETER RADIO CHANNEL

Baryshnikov N., Vologin S., Putilin A.

Public Joint-Stock Company "Information Telecommunication Technologies"

This article explores the development of modulation techniques in decameter radio channels. The advantages and disadvantages of currently used modulation techniques are discussed. The proposed methods for improving modulation techniques include clipping the transmitted signal, using non-orthogonal frequency division multiplexing, time-shifting adjacent channel transmissions in a parallel modem, and switching to a Single Carrier – Frequency Division Multiple Access digital modulation scheme. The benefits of using the proposed techniques are assessed both by changing the noise immunity limits of the implemented modems and by increasing the spectral efficiency of the proposed modulation techniques.

Keywords: modulation, decameter range, non-orthogonal frequency division multiplexing

УДК 004.6:34:005
ГРНТИ 10.35

НОРМАТИВНО-ПРАВОВОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ РАСПРЕДЕЛЁННЫХ РЕЕСТРОВ В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЕМ

К. В. Белоус, Е. А. Пиликина, Д. Г. Попугаев, А. П. Шабанов

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В статье рассматриваются особенности использования технологий распределенных реестров и анализируется имеющаяся нормативно-правовая база, регламентирующая их внедрение и деятельность. Обобщены требования российских и международных стандартов в области информационной безопасности, криптографической защиты и обращения цифровых активов. Исследованы положения законодательства Российской Федерации, а также зарубежные регуляторные инициативы, в том числе стандарты ISO и регламент MiCA. Сделан вывод о необходимости комплексного подхода к правовому и организационному обеспечению эксплуатации блокчейн-решений в управлении предприятиями.

блокчейн, распределенный реестр, правовое регулирование, информационная безопасность

Технология распределенных реестров, также известная как блокчейн, прошла длинный путь своего становления. Появление технологии связано с работой автора Сатоши Накомото «Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System» [1], опубликованной в октябре 2008 года и являющейся концептуальной базой первой децентрализованной криптовалюты. Запущенный в скором времени первый блокчейн-блок валюты ознаменовал начало работы сети и практическую реализацию концепции.

Какое-то время блокчейн был связан только с криптовалютами, однако технология вышла за пределы денежных переводов. Таким образом появились сети с программным кодом в блоке. Выполнение такого кода на узлах сети позволило создавать приложения на основе смарт-контрактов, то есть алгоритмов, автоматически выполняющих условия договора между сторонами при наступлении заранее определенных условий. Подобные приложения стали внедряться в сферах документооборота и логистики [2].

Механизмы блокчейн-технологии в рамках управления предприятием позволяют наладить автоматизацию процессов, в частности смарт-контракты позволяют перевести взаимодействие между подразделениями или партнерами в цифровой формат, при котором платеж, закрытие акта или передача прав происходят мгновенно при наступлении определенных условий. Кроме того, использование распределенного реестра позволяет создать виртуальную

среду, где информация об управленческих решениях, движении товаров или исполнении контрактов защищена. Таким образом достигается прозрачность цепочек поставок, исключение подмены данных в отчетности.

Эффективная интеграция рассматриваемой технологии в контур управления предприятием возможна только при условии строгого соблюдения сформированной нормативно-правовой базы и внедрения дополнительных организационных мер, связанных с рисками в использовании смарт-контрактов [3].

В отличие от зарубежного опыта, в Российской Федерации применение блокчейн-технологий в крупных масштабах началось сравнительно недавно, в связи с чем можно констатировать отсутствие специализированного утвержденного ГОСТа исключительно по технологиям блокчейн. Актуальность и интерес к технологии запустил процесс подготовки и составления нормативно-правовых актов в этой сфере, определив предварительно стратегические направления развития блокчейн в России. Формирование нормативно-методической базы создаст основу для единого цифрового информационного пространства, необходимого для решения задач государственного управления, что обеспечит внедрение современной модели интеллектуального управления. Унификация стандартов позволит ускорить разработку и внедрение передовых технологий, а также станет ключевым фактором достижения и удержания технологического лидерства России в высокотехнологичных секторах экономики.

На данный момент существует ряд отечественных правовых документов, направленных на регулирование в сфере технологии распределенных реестров. Среди которых наблюдается двухуровневый характер: 1) законы, регулирующие выпуск цифровых прав (токенов с эмитентом); 2) отдельное регулирование для криптовалют (без эмитента).

Рассмотрены некоторые из них:

- Федеральный закон от 31.07.2020 № 259-ФЗ «О цифровых финансовых активах, цифровой валюте и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации». Регулирует отношения, возникающие при выпуске, учете и обращении цифровых финансовых активов (далее – ЦФА) и цифровых валют. Закон определяет ЦФА как цифровые права, существующие в информационной системе на основе блокчейна. В редакции от 27.10.2025 Банк России получил право обязывать операторов систем частично или полностью прекращать обращение ЦФА, запрещать внесение изменений в записи систем, а также требовать замены единоличного исполнительного органа оператора [4].
- Федеральный закон «О привлечении инвестиций с использованием инвестиционных платформ и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» от 02.08.2019 N 259-ФЗ регулирует вы-

пуск утилитарных цифровых прав, которые являются аналогом инвестиционных токенов [5].

- Федеральный закон от 31.07.2020 № 258-ФЗ «Об экспериментальных правовых режимах (ЭПР) в сфере цифровых инноваций в РФ» устанавливает основы для создания «регуляторных песочниц». Закон позволяет временно приостанавливать действие устаревших норм, мешающих внедрению новых технологий, таким образом именно в рамках ЭПР с сентября 2024 года разрешено использование криптовалюты во внешней торговле [6].

Таким образом, на данный момент в стране технология блокчейн находится на переходной стадии от «регуляторных песочниц» к системному законодательству.

Кроме перечисленных выше документов, при применении технологии блокчейн можно выделять следующий ряд нормативных требований, а именно: ГОСТ Р 57580.1- 2018, ГОСТ Р ИСО/МЭК 27001-2021.

За рубежом базовым документом является регламент MiCA (Markets in Crypto-Assets Regulation), разработанный и принятый в Европейском Союзе. Регламент устанавливает единые правила для эмитентов и поставщиков услуг по криптоактивам во всех странах ЕС, и регулирует три вида токенов: 1) токены-активы (ART); 2) токены электронных денег (EMT); 3) прочие криптоактивы (служебные, инвестиционные).

Помимо национальных законов, важную роль в развитии технологии, в том числе – правовой, вносит международная стандартизация. Разработка и публикация стандартов блокчейна и технологий распределенного реестра сосредоточена в техническом комитете ISO/TC 307. Ключевые опубликованные стандарты:

- ISO 22739:2024 Blockchain and distributed ledger technologies – Vocabulary. Представляет собой международный стандарт, определяющий ключевые термины и определения, связанные с блокчейн-технологией и распределенными реестрами.
- ISO 23257:2022 Blockchain and distributed ledger technologies – Reference architecture. Описывает эталонную архитектуру, то есть основные компоненты, функции и взаимодействие между ними в системах на базе блокчейна.
- ISO/TS 23635:2022 Blockchain and distributed ledger technologies – Guidelines for governance. Содержит рекомендации по тому, как принимать решения, управлять изменениями и разрешать конфликты в блокчейн-сетях.
- ISO/TR 23576:2020 Blockchain and distributed ledger technologies – Security management of digital asset custodians. Посвящен управлению рисками и безопасности для организаций, которые хранят цифровые активы от имени клиентов.

- ISO/TR 23249:2022 Overview of existing DLT systems for identity management. Анализирует, как существующие DLT-системы решают вопросы цифровой идентификации.

Известны некоторые разрабатываемые стандарты:

- ISO/CD TS 23353 Blockchain and distributed ledger technologies – Auditing guidelines. Стандарт будет посвящен руководящим принципам аудита блокчейн-систем и технологий распределенного реестра (BC/DLT). Планируется охватить принципы аудита, связанные с ними риски и лучшие практики, ориентируясь на безопасность и аутентичность данных.
- ISO/WD 24876.6 Blockchain and distributed ledger technologies – Privacy protection when involving trust anchors in DLT-based identity management. В документе определяются различные типы доверенных точек и анализируется персональная идентифицирующая информация субъекта данных, обрабатываемая доверенными точками [7].

Современное нормативно-правовое обеспечение технологии блокчейн базируется на трех ключевых направлениях, которые отражены на рисунке 1.



Рис. 1. Основные направления формирования нормативно-правового обеспечения

Развитие технологии распределенных реестров имеет волнообразный характер. Это проявляется в чередовании фаз технологического прорыва и фаз правовой адаптации. В настоящее время мир переживает именно фазу активной пра-

вовой интеграции. Наличие документов на уровне государства могут способствовать в компаниях активному переносу учетов и операций в распределенные системы. В рамках российского правотворчества имеет смысл обращения к международным стандартам ISO. Будущее технологии блокчейн в стандартизации находится в развитии, уже сформированы и утверждены темы в актуальную редакцию программы национальной стандартизации и программы межгосударственной стандартизации; ведется работа на международном уровне, что свидетельствует о потребности в стандартизации рассматриваемой технологии.

Список используемых источников

1. Nakamoto S. Bitcoin: a peer-to-peer electronic cash system // Bitcoin.org. 2008. URL: <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf> (дата обращения: 12.02.2026).
2. Что такое блокчейн: история, применение и будущее технологии. URL: <https://www.rbc.ru/crypto/news/68c154f59a79477149d400a9> (дата обращения: 12.02.2026).
3. Попугаев Д. Г., Шабанов А. П. Применение технологии блокчейн при создании единого информационного пространства виртуального предприятия // Подготовка профессиональных кадров в магистратуре для цифровой экономики (ПКМ-2023): Сборник лучших докладов: в 2 т. / сост. Н. Н. Иванов. СПб.: СПбГУТ, 2024. Т. 2. С. 376-379.
4. О цифровых финансовых активах, цифровой валюте и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации: Федеральный закон от 31.07.2020 № 259-ФЗ (ред. от 27.10.2025) // Собрание законодательства Российской Федерации. 2020. № 31 (ч. 1). Ст. 5018.
5. Федеральный закон «О привлечении инвестиций с использованием инвестиционных платформ и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» от 02.08.2019 № 259-ФЗ.
6. Об экспериментальных правовых режимах в сфере цифровых инноваций в Российской Федерации: Федеральный закон № 258-ФЗ: [принят Государственной Думой 22 июля 2020 года; одобрен Советом Федерации 24 июля 2020 года].
7. ISO: Global standards for trusted goods and services. URL: <https://www.iso.org/home.html> (дата обращения: 12.02.2026).

REGULATORY AND LEGAL SUPPORT FOR THE USE OF DISTRIBUTED REGISTER TECHNOLOGY IN ENTERPRISE MANAGEMENT SYSTEMS

Belous K., Pilikina E., Popugaev D., Shabanov A.

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

The article discusses the features of using distributed registry technologies and analyzes the existing regulatory framework governing their implementation and operation. It summarizes the requirements of Russian and international standards in the field of information security, cryptographic protection, and the circulation of digital assets. The article examines the provisions of the legislation of the Russian Federation, as well as foreign regulatory initiatives, including ISO standards and the MiCA regulation. The article concludes that a comprehensive approach is necessary for the legal and organizational support of the use of blockchain solutions in enterprise management.

Key words: blockchain, distributed registry, legal regulation, information security

УДК 621.396.67
ГРНТИ 47.45.29**РАСЧЕТ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТАЦИОНАРНЫХ
СДВ СТАНЦИЙ НА ПРИМЕРЕ РАДИОСТАНЦИИ CUTLER****М. Г. Борисов, К. О. Коровин**

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В условиях высокой уязвимости связных и навигационных спутников от РЭБ, сверхдлинноволновый диапазон остается единственным средством надежной связи с удаленными объектами и радионавигации. Расчет рабочих характеристик (КПД антенн, полосы пропускания) необходим для оценки реального радиуса действия существующих систем и обоснования параметров перспективных СДВ-передатчиков, поскольку прямое экспериментальное тестирование на полную мощность крайне сложно и затратно. В данной работе выполнен расчет рабочих характеристик стационарной сверхдлинноволновой (СДВ) радиостанции на примере американского передающего центра Cutler. В ходе исследования рассмотрены основные параметры: эффективность излучения, входное сопротивление, полоса пропускания. Особое внимание уделено расчету КПД и излучаемой мощности. Полученные данные могут быть применены для оптимизации режимов работы российских СДВ-систем и при проектировании новых комплексов сверхдальней связи.

Cutler, моделирование, ФЕКО, диапазон СДВ, полоса пропускания, входное сопротивление, сопротивление излучения, КПД

Использование сверхдлинноволнового диапазона (СДВ, 3 – 30 кГц) занимает уникальное место в глобальной коммуникации и радионавигации. Благодаря способности радиоволн данного диапазона проникать на существенную глубину под поверхность воды, а также распространяться на значительные расстояния, СДВ-связь остается одним из способов обеспечения управления подводными лодками, находящиеся в погруженном состоянии, и организации дальней радионавигации как с подводными, так и надводными объектами.

Проектирование и эксплуатация СДВ-радиостанций сопряжено с техническими трудностями. Длина волны в данном диапазоне составляет десятки километров, что накладывает ограничения на минимальные размеры передающих антенн. Поэтому в рамках проектирование создания тестового макета попросту невозможно, в связи с большим объемом работ и затратами. При этом расчет рабочих характеристик антенн (входное сопротивление, КПД, вмещаемая мощность) требует значительной точности, для точ-

ного проектирования согласующей цепи радиопередающего устройства и покрытия требуемых областей связи и радионавигации.

Вопрос рабочих характеристик стационарных СДВ станций актуален и полученные результаты необходимы с целью дальнейшего развития и проектирования новых систем СДВ диапазона, для которых требуется знать эффективность уже существующих систем. При этом информации по таким станциям в открытом доступе крайне мало, имеется лишь отчеты на по некоторым из них (Cutler, Harold E. Holt, Omega и др.) и только на рабочих частотах. Поэтому крайне необходимо создание верифицированной модели существующих систем с данными не только для рабочей полосы, что позволит нам проводить сравнение эффективности, осуществлять расчет РЭБ, а также оценивать возможные зоны покрытия зарубежными станциями.

В качестве объекта исследования выбрана СДВ радиостанция Cutler – одна из мощнейших и эффективных станций в мире. Конструкция антенны имеет тип Trideco, или «Звезда», вид сверху представлен на рис. 1 слева. Антенна в своем составе насчитывает 13 мачт, шесть из которых установлены на внешнем радиусе ($R_2 = 935$ м) с высотой примерно 243 м, шесть мачт внутреннего радиуса ($R_1 = 553$ м) с высотой 266 м и одной центральной мачты с максимальной высотой около 300 м. Все мачты изготовлены из стальных ферм треугольного сечения и заземлены.

Подключение радиопередающего устройства осуществляется через удлинительную катушку, расположенную в антенном павильоне, и выводится на антенну через три коммутатора. Снижения антенны образованы шестью четырехпроводными фидерами, выполненными в виде воздушной линии, которые попарно расходятся от коммутаторов до двух смежных панелей (см. рис. 1 справа).

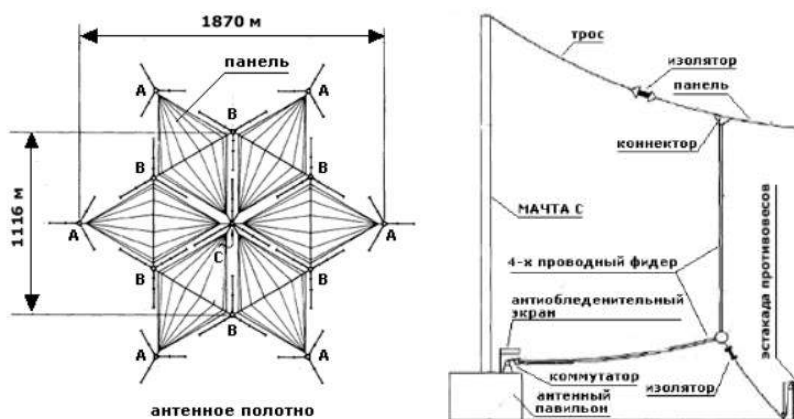


Рис. 1. Конструкция СДВ антенны Cutler

Антенное полотно состоит из шести лепестков ромбовидной формы (см. рис. 2), состоящих из 8 проводников, выполненных из бронзовых тросов диаметром 2,54 см. [1] Выбор бронзы в качестве проводящей поверхности обусловлен целью противостояния коррозии из-за воздействия морского климата. Крепление полотна к мачтам осуществляется через высоковольтные изоляторы, необходимые для изоляции полотна от заземленных мачт. Крайние проводники лепестка в районе изолятора покрыты эвердюрором, с целью уменьшения вероятности возникновения коронного разряда.

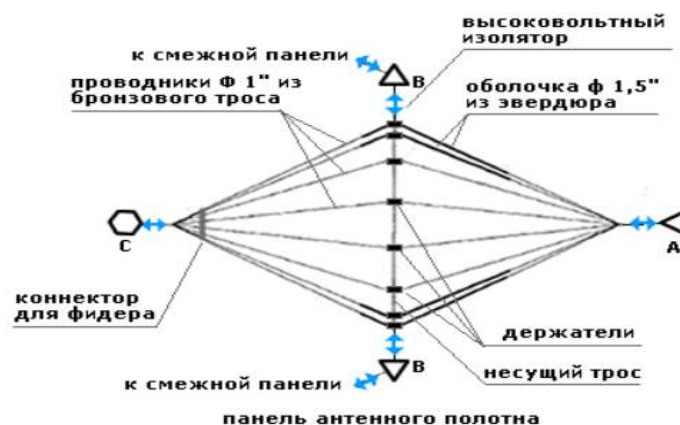


Рис. 2. Конструкция антенного полотна СДВ антенны Cutler

Система заземления радиостанции выполнена из медного проводника диаметром 6 мм, расположенного на глубине 0,3 м в виде радиальной системы с шагом 1 градус. Помимо этого, система заземления обеспечивает крайне низкое сопротивление за счет подключения радиальной сети к морю. В качестве подстилающей поверхности использовалась средняя проводимость земли, равная 0,005 См/м с относительной диэлектрической проницаемостью 4 [2].

Для создания верификационной модели использовалось моделирование в САПР Altair Feko, модель антенны представлена на рис. 3.

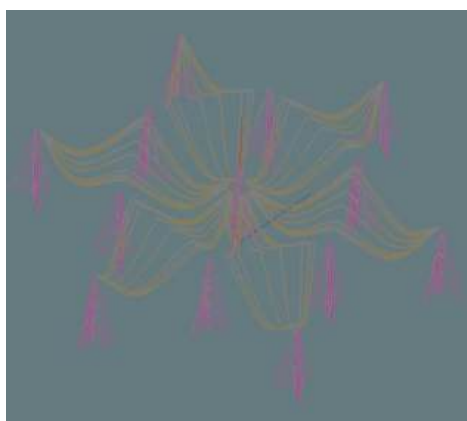


Рис. 3. Модель СДВ антенны Cutler в САПР Altair Feko

В результате моделирования были получены характеристики входного сопротивления антенны, результаты представлены на рис. 4, где синий график отражает активное входное сопротивление, а зеленый реактивное входное сопротивление.

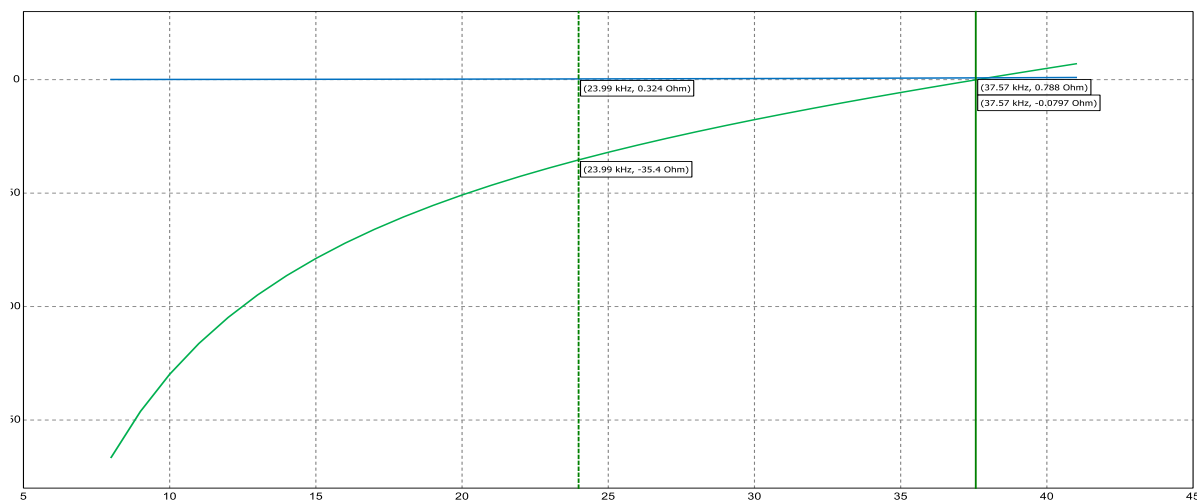


Рис. 4. Входное сопротивление СДВ антенны Cutler (синий – активное, зеленый – реактивное сопротивление)

На основании входного сопротивления антенны, а также излучающей способности модели с помощью ПЭВМ были выполнены расчеты значений КПД и полосы пропускания антенны, результаты которых представлены на рис. 5 соответственно.

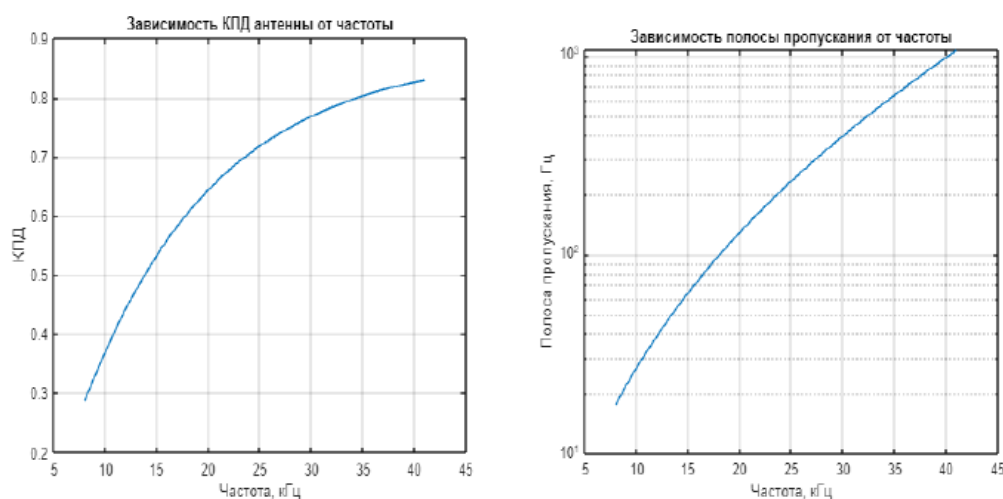


Рис. 5. Зависимость КПД и полосы пропускания СДВ антенны Cutler от частоты

Результаты моделирования и расчета характеристик для наглядности сведены в таблицу 1.

ТАБЛИЦА 1. Значения основных характеристик СДВ антенны Cutler, полученных в рамках моделирования и измерений

Характеристики	Измеренные [3]	Моделирова- ние	Аналит. расчет
Эффективная высота (м)	140,1±2,8	144,8	-
Резонансная частота (кГц)	40,2	37,6	-
Статическая емкость (нФ)	123,9	170,9	-
Вх. сопротивление антенны (Ом)	0,2649-j35,4	0,3014-j38,8	-
Сопротивление излучения (Ом)	0,1984±0,0077	0,212	-
Полоса пропускания (Гц)	137,5	209,7	-
КПД антенны	74,9 %	70,5 %	84,8 %

Как мы можем видеть, полученная модель незначительно расходится с результатами измерения на рабочей частоте (24 кГц). Это может быть объяснено сложностью учета влияния подстилающей поверхности и системы заземления.

Второй способ позволяет производить быстрый расчет эффективности антенны на основе геометрических размеров под антенного полотна.

$$\eta = \frac{Q_{уд}}{Q_{уд} + Q_A}$$

где $Q_{уд}$ – добротность удлинительной катушки, Q_A – добротность антенны, определяемая как [4]:

$$Q_A = \frac{3\lambda^3}{8\pi^2 V}$$

где λ – длина волны, V – занимаемый антенной объем.

Результаты грубого аналитического расчета также приведены в таблице 1. Как мы можем видеть, погрешность с измеренными значениями значительно больше, чем при моделировании в САПР, но данный метод не требует значительных ресурсов и времени, что позволяет быстро оценивать эффективность различных систем.

В данной работе выполнен расчет рабочих характеристик стационарной сверхдлинноволновой (СДВ) радиостанции на примере американского передающего центра Cutler. Построена верифицированная модель радиостанции Cutler в САПР Altair Feko. На основе представленных результатов

для верификации результатов проектирования антенны наиболее эффективным является проектирование модели в САПР Altair Feko, но данный процесс крайне ресурсно- и время затратен, когда как приближенный аналитический расчет позволяет быстро оценить приблизительные характеристики и выбрать ориентировочные размеры антенны. Полученные данные могут быть применены для оптимизации режимов работы российских СДВ-систем и при проектировании новых комплексов СДВ связи и радионавигации.

Список используемых источников

1. Xie H. et al. Multiobjective Particle Swarm Optimization to Design the Top Load of a Very Low Frequency Thirteen-Tower Umbrella Antenna //International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering. 2023. Т. 2023. № 1. С. 1792918.
2. Рекомендация МСЭ-R P.368-8. Кривые распространения земной волны для частот между 10 кГц и 30 МГц.
3. Hansen P., Chavez J., Olsen R. VLF cutler: September 1997, four-panel tests; RADHAZ and field strength measurement. 1998. № TR1761.
4. ОСТ 4.209.001-78, Антенны передающие ДВ и СДВ диапазонов. Методы расчета электрических параметров. 1978.

CALCULATION OF THE OPERATING CHARACTERISTICS OF STATIONARY VLF STATIONS USING THE CUTLER RADIO STATION AS AN EXAMPLE

Borisov M., Korovin K.

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

Given the high vulnerability of communications and navigation satellites to electronic warfare, the very long wave (VLF) band remains the only means of reliable communication with remote objects and radio navigation. Calculating operating characteristics (antenna efficiency, bandwidth) is necessary to assess the actual range of existing systems and validate the parameters of prospective VLF transmitters, as direct experimental testing at full power is extremely difficult and costly. This paper calculates the operating characteristics of a stationary very long wave (VLF) radio station using the Cutler Transmitting Center in the United States as an example. The study examines key parameters: radiation efficiency, input impedance, and bandwidth. Particular attention is paid to calculating the efficiency and radiated power. The obtained data can be used to optimize the operating modes of Russian VLF systems and in the design of new ultra-long-range communication systems.

Key words: Cutler, modeling, FEKO, VLF band, bandwidth, input impedance, radiation resistance, efficiency

УДК 654.739

ГРНТИ 49.33.29

К АКТИВИЗАЦИИ ФОРМИРУЮЩЕГО РЕСУРСА ОБУЧЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИМ ОСНОВАМ ЭЛЕКТРОНИКИ

С. В. Борисов¹, А. Э. Ланда¹, Ю. С. Остроумова²,
С. Д. Ханин¹, П. П. Шумаков¹

¹Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

²Военно-медицинская академия им. С. М. Кирова

Раскрываются предпосылки и определяются ориентиры активизации формирующего ресурса физических основ электроники в обучении студентов инженерных вузов. С дидактических и методологических позиций обосновывается необходимость изменений в содержании и организации образовательного процесса. Формулируются направленные на достижение преследуемой цели методико-технологические рекомендации и приводится информация о конкретных, могущих быть использованными в практике обучения методических разработках. Аргументируется целесообразность и рассматриваются возможности целостного практикоориентированного исследовательского обучения.

физические основы электроники, формирующий ресурс и его активизация, содержание и организация обучения, задачно-деятельностный подход, исследовательский и проектный методы обучения

Один из важнейших, имеющий метапредметное значение, приоритет в обучении физике в вузах состоит в формировании у обучающихся требуемых в наукоемком решении проблемных задач способностей [1-3]. Особая роль здесь принадлежит профессионально ориентированным физическим дисциплинам, каковой является дисциплина «Физические основы электроники».

Формирующий ресурс этой дисциплины предопределяется целым рядом обстоятельств, к основным из которых относятся: востребованность для изучения физических принципов работы элементов электронной базы функциональных систем высокого уровня организации умственной деятельности, обязательность доказательности в освоении содержания обучения, его основательность в плане освоения логики и методологии практикоориентированной поисково-познавательной деятельности, в их конкретных, ведущих к значимым результатам проявлениях.

Способности к получению и применению научных знаний в целях решения практических задач, как и любые другие способности, могут формироваться в образовательной деятельности по освоению содержания обучения. С опорой на результаты проведенных исследований [1, 4, 5] и опыт преподавания в настоящей работе определяются и обосновываются необходимые для активизации формирующего ресурса содержания обучения физическим основам электроники условия и методико-технологические средства их практической реализации.

К числу подлежащих реализации в практике обучения условий отнесены следующие.

1. Приоритет в содержательном наполнении обучения основательности в плане формирования готовности к освоению проблематики и передовых достижений научно-технологического развития в области электроники.

Критерием для выбора отвечающего этому условию учебного материала должна быть его значимость как физической основы перспективных направлений научно-технологического развития и потенциал будущего применения в ближайшей и среднесрочной перспективе.

В качестве представляющего интерес, но неоправданно остающегося за рамками учебных программ материала может выступать содержание физики полупроводниковых гетероструктур и систем пониженной размерности как основы создания современных базовых элементов электроники сверхвысоких частот и оптического диапазона [6-9]. Не утрачивают своего значения и физические основы создания резистивных и емкостных элементов, на что, в частности, указывает прогресс в области создания нейроморфных систем на основе мемристоров.

2. Максимально возможное задействование в представлении и освоении подлежащего освоению материала задачного подхода.

Выполнение этого условия отвечает проблемно-деятельностному подходу в обучении, реализация которого с необходимостью предусматривает востребованность высокого уровня самостоятельности обучающихся в получении знаний [3].

Решение направленных на освоение содержание обучения задач может преследовать цели пропедевтики, в овладении базовыми понятиями и представлениями [10], выявления представляющих интерес физических эффектов, анализа последних на предмет практического применения, в том числе, выработке требований к материалам, могущим быть использованными для создания элементов электронной базы функциональных систем [1, 4, 5].

Принципиально важной в дидактическом плане целью является формирование у обучающихся опыта творческой деятельности, в связи с чем в круг предлагаемых задач должны включаться открытые (еще не имеющие своего окончательного решения) задачи.

3. Целостность в отражении содержания обучения методология практикоориентированной поисково-познавательной деятельности.

В построении содержания обучения должна преобладать осуществляемая сообразно подлежащей целостному освоению методологии динамическая развертка предметного материала от контекста постановки изучаемой проблемы до результатов ее решения и определения направлений и перспектив дальнейшей работы. Наряду с общими представлениями о методологии решения проблемных задач, внимание обучающихся должно акцентироваться на проявляемой в научно-технологической деятельности ее нелинейность.

В организации познавательной деятельности предпочтение следует отдавать там, где это возможно, методам целостного исследовательского обучения и проектного (проектно-исследовательского) обучения [4, 5].

4. Направленность образовательного процесса на обучение методам решения проблемных задач.

Готовность к решению проблемных задач с необходимостью предполагает владение его методами, круг которых охватывает методы всех ветвей современной физики – экспериментальной, теоретической и вычислительной (компьютерной).

Особого внимания заслуживает обучение моделированию как методу, с необходимостью востребованному во всех указанных ветвях и связующему между экспериментом, теорией и практикой. При этом, в силу присущих физическим основам электроники, с одной стороны, множественности модельных представлений о представляющих интерес объектах и процессах и, с другой стороны, разработанности единых подходов к интерпретации свойств различных объектов, в преподавании открывается возможность обучения не только моделированию, но и его принципам [11-13].

Принципиально важное значение имеет открываемое обучением физическим основам электроники окно возможностей формирования у обучающихся способности к критической оценке доказательности существующих модельных представлений. Последнее может выступать как стартовый момент для расширения арсенала используемых для решения проблемных задач методов, придания ему требуемых комплексности и системности.

5. Наличие соответствующего ресурсобеспечения образовательного процесса.

Достижение преследуемой цели требует существенного системного расширения используемых в образовательном процессе ресурсов:

- учебно-методического ресурса – в силу необходимости расширения информационной базы и разработки новых информационных источников, отражающих содержание проблематики перспективных направлений научно-технологической деятельности в области электроники;
- материально-технического ресурса – в силу необходимости оснащения вуза современным оборудованием аналитического и технологического назначения;
- кадрового ресурса – в силу необходимости профессионального научно-методического сопровождения образовательного процесса, интеграции в нем учебной, исследовательской и проектной деятельности;
- организационно-управленческого ресурса – в силу необходимости принятия своевременных решений по модернизации учебных программ, обновления кадрового состава и материально-технического обеспечения, совершенствованию существующих и созданию новых лабораторий.

Ведущими в научно-методическом обеспечении активизации формирующего ресурса обучения физическим основам электроники могут служить выработанные в теории и методике обучения физике и доказавшие свою эффективность практики ведущих образовательных центров модели организации обучения как учебной модели учебной деятельности и обучения через исследовательскую деятельность, направленную на решение актуальных открытых задач [14, 15].

Отметим некоторые отвечающие указанным моделям и необходимости придания обучению практикоориентированного характера методико-технологические средства.

Методическое сопровождение требуемых для освоения нового материала самообразовательной и информационно-аналитической работы должно предусматривать акцентацию внимания обучающихся на профессиональной значимости подлежащего изучению материала и его органическую связь с имеющимися знаниями, могущими стать ведущими в познавательной деятельности [1].

Особое значение имеет выработка у обучающихся с опорой на изучаемую проблематику предметного видения инженерного потенциала физических знаний. Представительными примерами здесь могут служить изучение

физических подходов к созданию резистивных материалов, обладающих одновременно высоким удельным сопротивлением и малым его температурным коэффициентом [1] и к созданию амплитудных ограничителей интенсивного лазерного излучения [16, 17].

В части обучения методам решения проблемных задач широкое поле для выбора предметного материала открывает используемые в передовых технологиях электроники методы электронного материаловедения и диагностики. Таковым, например, является метод широкодиапазонной спектроскопии полной проводимости, информативность которого выразительно раскрывается в его применении к анализу транспортных свойств функциональных материалов с неупорядоченной структурой [18].

Список используемых источников

1. Остроумова Ю. С. Совершенствование подготовки военно-инженерных кадров к решению наукоемких профессиональных задач: монография. СПб.: ВАС, 2019. 240 с.
2. Костарев С. В., Остроумова Ю. С., Ханин С. Д. Совершенствование подготовки курсантов военно-инженерного вуза по физике в контексте реализации Стратегии научно-технологического развития // Профессиональное образование в России и за рубежом, 2017. № 4(28). С. 167-171.
3. Костарев С. В., Остроумова Ю. С., Ханин С. Д., Жуков В. А. Проблемно-деятельностный подход к организации учебного процесса в военном вузе как средство формирования у курсантов методологической культуры // Развитие военной педагогики в XXI веке: Материалы V межвузовской научно-практической конференции. СПб.: ВАС, 2018. С. 39-46.
4. Ханин С. Д., Хинич И. И. Исследовательское обучение физическим основам электроники в подготовке педагогических кадров: монография. СПб.: Изд-во РГПУ им. А. И. Герцена, 2009. 127 с.
5. Ханин С. Д., Хинич И. И. Освоение физики материалов и приборов электронной техники и проблема достижения целостности и результативности исследовательского обучения: монография. СПб.: Изд-во РГПУ им. А. И. Герцена, 2009. 108 с.
6. Алферов Ж. И. Двойные гетероструктуры: концепции и применение в физике, электронике и технологии (Нобелевские лекции по физике) // Успехи физических наук, 2002., Т. 172. № 9. С. 1068-1086.
7. Пихтин А. Н. Оптическая и квантовая электроника. М.: Высшая школа, 2001. 573 с.
8. Пожела Ю. Физика быстродействующих транзисторов: монография. Вильнюс: Мокслос, 1989. 266 с.
9. Лебедев А. И. Физика полупроводниковых приборов. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. 488 с.
10. Ханин Д. С. Формирование представлений и понятий физики конденсированного состояния вещества в задачах общего курса физики. – Дисс... канд. пед. наук. СПб., 2005. 154 с.
11. Мышкис А. Д. Элементы теории математических моделей. М.: Наука, 1994. 192 с.

12. Михалкин В. С. Основные концепции математического моделирования физических объектов и систем. Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 1999. 140 с.
13. Зайцев В. Ф. Математические модели в точных и гуманитарных науках. СПб.: БАН, 2006. 112 с.
14. Кондратьев А. С., Прияткин Н. А. Качественные методы при изучении физики в школе и вузе. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2000. 93 с.
15. Кондратьев А.С., Филиппов М.Э. Физические задачи и математическое моделирование реальных процессов. СПб.: Изд-во РГПУ им. А. И. Герцена, 2001. 111 с.
16. Розеншер Э., Винтер Б. Оптоэлектроника. М.: Техносфера, 2004. 590 с.
17. Сидоров А. И. Физические основы и методы управления излучением в устройствах интегрированной оптики. СПб.: ГЭТУ «ЛЭТИ», 2007. 78 с.
18. Физика неупорядоченных и наноструктурированных оксидов и халькогенидов металлов: монография / Под ред. Г. А. Бордовского. СПб.: Изд-во РГПУ им. А. И. Герцена, 2011. С. 69-104.

ACTIVATING THE FORMATIVE RESOURCE FOR LEARNING PHYSICAL BASICS OF ELECTRONICS, TO

Borisov S.¹, Landa A.¹, Ostroumova Yu.², Khanin S.¹, Shumakov P.¹

¹The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

²Military Medical Academy named after S. M. Kirov

The prerequisites are revealed and the guidelines for activating the formative resource of the physical foundations of electronics in the education of engineering students are determined. From didactic and methodological positions, the necessity of changes in the content and organization of the educational process is substantiated. Methodological and technological recommendations aimed at achieving the goal are formulated and information is provided on specific methodological developments that can be used in teaching practice. The expediency is argued and the possibilities of holistic practice-oriented research training are considered.

Key words: *the physical foundations of electronics, the formative resource and its activation, the content and organization of training, the task-activity approach, teaching by using research and project methods*

УДК 654.739

**МЕТОДЫ ИНЖЕНЕРИИ ЭЛЕКТРОННЫХ СПЕКТРОВ
КАК СРЕДСТВО И ПРЕДМЕТ ОБУЧЕНИЯ
ФИЗИЧЕСКИМ ОСНОВАМ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ
ЭЛЕКТРОНИКИ СВЕРХВЫСОКИХ ЧАСТОТ
И ОПТИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНА**

**С. В. Борисов¹, А. Э. Ланда¹, Ю. С. Остроумова²,
С. Д. Ханин¹, П. П. Шумаков¹**

¹Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

²Военно-медицинская академия им. С. М. Кирова

Раскрывается потенциал использования методов инженерии электронных спектров как средства освоения обучающимися физических принципов, лежащих в основе функционирования элементов полупроводниковой электроники сверхвысоких частот и оптического диапазона. Предлагается и методически конкретизируется алгоритмический подход к обучению построения энергетических диаграмм функциональных полупроводниковых гетероструктур, включая структуры с активной областью пониженной размерности. Показываются возможности отражения в содержании обучения конструктивной роли результатов инженерии электронных спектров как ориентационной основы конструктивно-технологических решений элементной базы. Аргументируется целесообразность в этом аспекте интеграции в учебный процесс реферативных семинаров и предлагается методика их содержательного наполнения и организации.

инженерия электронных спектров, гетероструктурные полупроводниковые элементы, квантовые ямы, сверхрешетки, квантовые точки, физические принципы функционирования, содержание и организация обучения

Будучи направленным на подготовку специалистов, обучение студентов инженерных специальностей профессионально ориентированным физическим дисциплинам должно с необходимостью опираться на принятые в проектировании на физическом уровне представляющих интерес функциональных объектов методы и быть основательным в плане их освоения на уровне, отвечающем целям образования применения этих методов к новым целям [1]. К таким методам в обучении физическим основам электроники сверхвысоких частот и оптического диапазона относятся методы инженерии электронных спектров [2, 3].

Роль этих методов как средства обучения выразительно была охарактеризована в Нобелевской лекции по физике Г. Кремера в форме Леммы о Не-

понимании: «Если при обсуждении физики полупроводников вы не можете нарисовать Энергетическую Зонную Структуру, значит вы не понимаете, о чем вы говорите. Отсюда следует, что, если вы можете ее нарисовать, но не делаете этого, значит ваши слушатели не понимают, о чем вы говорите» [4].

В отношении рассмотрения физических принципов работы элементов электроники сверхвысоких частот и оптического диапазона легче назвать те из них, которые не нуждаются в своем объяснении в знании энергетической диаграммы изучаемого объекта. Характеризуя же существующее состояние дел в практике обучения, приходится констатировать, что для большей части обучающихся построение энергетических диаграмм представляется сложной задачей, решение которой требует особых способностей.

Вместе с тем, научить строить энергетические диаграммы можно всех желающих этому научиться, если использовать для этого алгоритмический подход [5].

В качестве примера приведем выработанный алгоритм построения энергетической диаграммы полупроводникового гетероперехода на предмет раскрытия физических основ функционирования быстродействующих транзисторов и полупроводниковых инжекционных лазеров [6, 7].

Предварительно, в дополнение к известным из физики гомогенного электронно-дырочного перехода параметрам – энергии Ферми и ширине запрещенной зоны, вводятся еще два необходимых для построения параметра: работа выхода электронов как энергетическое расстояние между уровнем Ферми и уровнем энергии свободного электрона и электронное сродство, как энергетическое расстояние между краем зоны проводимости и уровнем энергии свободного электрона.

Предлагаемый в целях обучения алгоритм построения энергетической диаграммы состоит в следующем.

1. Провести единый для всей гетероструктуры в состоянии термодинамического равновесия уровень Ферми.
2. Для каждого из контактирующих полупроводников отложить от уровня Ферми работу выхода электронов и соответственно этому провести уровень энергии свободного электрона.
3. Сделать уровень свободного электрона непрерывным.
4. От уровня энергии свободного электрона для каждого из контактирующих полупроводников отложить энергию электронного сродства и, учитывая ее одинаковость во всех сечениях полупроводника, провести уровень дна зоны проводимости.

5. Отложить от уровня дна зоны проводимости каждого из контактирующих полупроводников присущую им ширину запрещенной зоны и построить уровень потолка валентной зоны.

В результате выполненного построения обучающиеся выявляют основную особенность энергетической диаграммы полупроводникового гетероперехода – наличие разрывов краев разрешенных зон. На этой основе в рассмотрение вводятся присущие гетеропереходам эффекты односторонней инжекции и сверхинжекции [2, 8], указывающие на перспективность использования гетеропереходов в качестве элементов быстродействующих биполярных и полевых транзисторов и инжекционных лазеров.

На следующем этапе обучения может быть осуществлен переход к полупроводниковым гетероструктурам инжекционных лазеров с активной областью нанометровых размеров, где в электронном спектре проявляются эффекты размерного квантования [2, 8].

К выводу о наличии уровней размерного квантования в двумерной системе (квантовой яме) обучающиеся приходят на основании анализа хрестоматийной модели потенциального ящика, ширина которого меньше 100 нм [5]. Выявляемая зависимость этих уровней от размеров образца создает основания для понимания роли последних как модифицируемого фактора формирования требуемых электронных свойств функциональных материалов. Открываемые здесь возможности конкретизируются на примере обеспечения управляемости спектральным составом излучения, уменьшения пороговой для генерации лазерного излучения плотности тока, ее температурной стабильности [8, 9].

Далее может быть рассмотрена создаваемая на основе гетеропереходов структура, представляющая собой двойной потенциальный барьер с квантовой ямой, что позволяет раскрыть принцип действия резонансно-туннельного диода [6]. Такой диод, в силу идеальных условий для туннелирования при совпадении энергии транспортируемого электрона с энергией уровня размерного квантования, обладает рекордным быстродействием, а также вольтамперной характеристикой с отрицательным дифференциальным сопротивлением. Последнее выступает как предпосылка для использования рассматриваемой структуры в качестве элемента рабочей структуры транзисторов на квантовых эффектах, что как показывается, существенно расширяет их функциональные возможности [7].

Руководствуясь энергетической диаграммой структуры с тремя квантовыми ямами, разделенными потенциальными барьерами, раскрывается

принцип действия каскадных лазеров, излучение которых непосредственно осуществляется посредством электронных переходов между уровнями размерного квантования [8], что позволяет преодолеть «тиранию запрещенной зоны». При этом подчеркивается возможность перекрытия такими лазерами всего ИК диапазона, что предопределяется возможностью управления спектральным составом излучения посредством изменения геометрических параметров гетероструктуры.

Вслед за этим могут быть рассмотрены сверхрешетки. Особенность присутствующего им энергетического спектра при малой ширине разделяющей квантовые ямы потенциальных барьеров, а именно, образование энергетических мини-зон, позволяют понять целесообразность применения сверхрешеток для поставки носителей заряда в область электронного ограничения в гетероструктурах с целью повышения мощности излучения полупроводниковых лазеров, а также потенциал сверхрешетки как структуры, на основе которой могут создаваться фотоприемники на переходах между уровнями размерного квантования [6, 8, 9]. В отношении последних раскрываются возможности уменьшения темнового тока, повышения фоточувствительности и расширения ее спектральной области посредством изменения геометрических и энергетических параметров квантовых ям и потенциальных барьеров.

Особого внимания заслуживают наиболее перспективные в плане создания излучательных и фотоприемных устройств квантовые точки, электронный спектр которых аналогичен спектру атома [9, 10]. Дискретный характер энергетического спектра квантовых точек и энергетически глубокая локализация в них носителей заряда предопределяет возможности достижения рекордно низких пороговой для генерации лазерного излучения плотности тока и его температурной зависимости. Это обеспечивает возможность функционирования лазеров с квантовыми точками в непрерывном режиме при повышенных температурах, как это имеет место при размещении полупроводниковых излучателей вблизи элементов транзисторной логики [11, 12].

Наряду с определением принципов работы базовых элементов электроники сверхвысоких частот и оптического диапазона, методы инженерии электронных спектров являются ориентационной основой для принятия конструктивных технологических решений.

Этот аспект может служить лейтмотивом проблематики, обсуждаемой в форме реферативных семинаров. В тематике последних с опорой на авторитетные информационные источники может быть прослежено развитие технологий приборных гетероструктур – от методов эпитаксиального роста,

используемых для создания лазеров на основе объемных полупроводников с присущими им жесткими ограничениями в выборе контактирующих материалов до технологии изготовления гетеролазеров на основе рассогласованных структур, и, наконец, на основе квантовых точек.

Несомненный интерес в рассматриваемом контексте представляет и проблематика создания устройств, предназначенных для ограничения интенсивности лазерного излучения [13, 14]. Наряду с объемными полупроводниками и системами пониженной размерности, в поле зрения обучающихся при этом попадают проявляющие фазовый переход «полупроводник-металл» бистабильные материалы, электронный спектр которых в неметаллическом состоянии определяется межэлектронным взаимодействием [15].

В подготовке к таким семинарам обучающимися могут выполняться формулируемые в проектной форме задания. Примерами таковых являются аргументированный выбор материалов для создания рабочих структур полупроводниковых лазеров, определение модифицируемых конструктивных и технологических факторов, влияющих на мощность полупроводниковых лазеров на основе гетероструктур с отдельным электронным и оптическим ограничением, изыскание возможностей управления оптическими свойствами бистабильных металлооксидных материалов в целях создания ограничителя лазерного излучения с необходимыми функциональными свойствами.

В части лабораторного практикума эффективным средством обучения методам электронных спектров и раскрытия их потенциала является, как показывает опыт, компьютерное моделирование с выходом на представляющие интерес функциональные свойства гетероструктур, проверяемые посредством натурального эксперимента.

Отражения в лабораторном практикуме заслуживает диагностика приборных гетероструктур на предмет определения действительного профиля краев разрешенных зон, разрывов в них и энергии уровней размерного квантования [3]. В качестве основного метода эксперимента здесь может выступать метод электрохимического вольт-фарадного профилирования. При этом аналитическая часть работы предусматривает последовательное решение уравнений Пуассона и Шредингера с использованием метода итераций. Проверочным для получаемых результатов служит позволяющий определить длину волны излучения гетероструктур метод фотолюминесценции [12].

Список используемых источников

1. Дьюи Дж. Демократия и образование. М.: Педагогика-Пресс, 2000. 384 с.

2. Алферов Ж. И. Двойные гетероструктуры: концепции и применение в физике, электронике и технологии (Нобелевские лекции по физике) // Успехи физических наук, 2002., Т. 172. № 9. С. 1068-1086.
3. Нанотехнология: физика, процессы, диагностика, приборы / Под ред. В. В. Лучина и Ю. М. Таирова. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. 552 с.
4. Кремер Г. Квазиэлектрическое поле и разрывы зон. Обучение электронов новым фокусам (Нобелевские лекции по физике) // Успехи физических наук, 2002. Т. 172. № 9. С. 1087-1101.
5. Остроумова Ю. С. Совершенствование подготовки военно-инженерных кадров к решению наукоемких профессиональных задач: монография. СПб.: ВАС, 2019. 240 с.
6. Лебедев А. И. Физика полупроводниковых приборов. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. 488 с.
7. Пожела Ю. Физика быстродействующих транзисторов: монография. Вильнюс: Мокслос, 1989. 266 с.
8. Пихтин А. Н. Оптическая и квантовая электроника. М.: Высшая школа, 2001. 573 с.
9. Жуков А. Е. Основы физики и технологии полупроводниковых лазеров. СПб.: Изд-во Академ. ун-та, 2016. 364 с.
10. Крыжановская Н. В., Максимов М. В., Жуков А. Е. Лазеры на основе квантовых точек и микрорезонаторов: модели шепчущей галереи // Квантовая электроника, 2014. Т. 44. № 1. С.189-201.
11. Тарасов И. С. Мощные полупроводниковые лазеры на основе гетеропереходов раздельного ограничения // Квантовая электроника, 2010. Т. 40. № 8. С. 661-681.
12. Попылев Д. С., Новиков И. И., Рочас С. С., Кремлева А. В., Карачинский Л. Я. Полупроводниковые лазеры и приборы на их основе. СПб.: Университет ИТМО, 2024. 71 с.
13. Розеншер Э., Винтер Б. Оптоэлектроника. М.: Техносфера, 2004. 590 с.
14. Сидоров А. И. Физические основы и методы управления излучением в устройствах интегрированной оптики. СПб.: ГЭТУ «ЛЭТИ», 2007. 78 с.
15. Мотт Н. Переход металл-изолятор. М.: Мир, 1979. 342 с.

METHODS OF ELECTRONIC SPECTRUM ENGINEERING AS A MEANS AND SUBJECT OF EDUCATION THE PHYSICAL FOUNDATIONS OF ULTRAHIGH FREQUENCY SEMICONDUCTOR ELECTRONICS AND OPTICAL RANGE

Borisov S.¹, Landa A.¹, Ostroumova Yu.², Khanin S.¹, Shumakov P.¹

¹The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

²Military Medical Academy named after S. M. Kirov

The potential of using electronic spectrum engineering methods as a means for students to master the physical principles underlying the functioning of elements of semiconductor electronics of ultrahigh frequencies and optical range is revealed. An algorithmic approach to learning how to construct energy diagrams of functional semiconductor heterostructures, including structures with a low-dimensional active region, is proposed and methodically specified. The possibilities of reflecting in the teaching content the constructive role of the results of electronic spectrum engineering as an orientation basis for structural and technological solutions of the element base are shown. The expediency of integrating abstract seminars into the educational process in this aspect is argued, and a methodology for their meaningful content and organization is proposed.

Key words: *electronic spectrum engineering, heterostructural semiconductor elements, quantum wells, superlattices, quantum dots, physical principles of functioning, content and organization of training*

УДК 004.75

ГРНТИ 49.33.29

МИКРОСЕРВИСНАЯ АРХИТЕКТУРА В V2X-СИСТЕМАХ

А. Г. Владыко, П. В. Плотников, Г. И. Тамбовцев

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Развитие систем V2X (Vehicle-to-Everything) и интеллектуальных транспортных систем (ITS) приводит к формированию распределенной вычислительной среды, в которой обработка данных и принятие решений осуществляются на уровне транспортных средств, дорожной инфраструктуры и периферийных вычислительных узлов. В этой связи микросервисная архитектура рассматривается как перспективный подход к построению программных систем, обеспечивающий модульность, масштабируемость и гибкость развертывания. В работе представлен обзор и систематизация сервисов, применяемых в V2X-среде, с акцентом на их функциональную роль, требования к задержкам и критичность для обеспечения безопасности дорожного движения. Предлагается классификация сервисов по уровням приоритета и требованиям к размещению.

Работа направлена на формирование целостного представления о структуре микросервисов в V2X и выявление ключевых требований к их размещению на распределенных вычислительных системах ITS.

Vehicle-to-Everything, V2X, микросервисная архитектура, интеллектуальные транспортные системы

Введение

Развитие интеллектуальных транспортных систем связано с переходом от изолированных электронных компонентов автомобиля к распределенной цифровой экосистеме, в которой транспортное средство взаимодействует с другими автомобилями, дорожной инфраструктурой, пешеходами, сетевыми платформами и облачными сервисами. Такая модель получила название V2X (Vehicle-to-Everything).

V2X-системы предъявляют к программной архитектуре ряд требований. Они должны обеспечивать минимальную задержку, высокую надежность и предсказуемость поведения, поскольку значительная часть функций связана с безопасностью движения. При этом, V2X-системы должны быть гибкими, то есть поддерживать обновления, интеграцию новых сервисов, работу с различными коммуникационными технологиями, взаимодействие с МЕС, граничной и туманной [1] инфраструктурой, при этом иметь возможности масштабирование в условиях плотного городского трафика.

Также, отметим ограниченность вычислительных ресурсов бортовых устройств (On Board Unit, OBU) и устройств дорожной периферии, например, придорожных устройств (Roadside Unit, RSU)

В традиционной архитектуре требования к гибкости сервисов реализуется достаточно слабо. Классическая система объединяет множество функций в единый программный контур, что затрудняет независимое обновление отдельных компонент, повышает риск каскадных отказов и усложняет интеграцию с внешними участниками V2X-среды. В связи с этим все большее значение приобретает микросервисная архитектура, предполагающая разбиение сложной системы на набор независимых сервисов с четко заданными интерфейсами.

В данной работе будут рассмотрены ограничения традиционного подхода в V2X-системах, определены преимущества микросервисной архитектуры и сформирована модель приоритизации микросервисов на основе ряда характеристик, таких, например, как задержка, ресурсная нагрузка и позиционирование области исполнения.

Преимущества и недостатки традиционной V2X-архитектуры

Классическая архитектура [2] предполагает, что основные функции системы реализуются внутри единого приложения или тесно связанного программного комплекса. Такой подход может быть использован для относительно статичных систем с ограниченным набором функций, но в условиях V2X он становится архитектурным ограничением.

Высокая связность компонентов накладывает ряд ограничений на традиционную архитектуру. Изменение одного модуля может затрагивать другие части системы, что усложняет тестирование, сертификацию и выпуск обновлений. Для автомобильных систем это особенно критично, поскольку программные изменения должны проходить проверку не только на корректность, но и на соответствие требованиям функциональной безопасности. Более того, в такой архитектуре трудно масштабировать только одну функцию. Также, при плохом проектировании, классические сервисы часто страдают от низкой отказоустойчивости. Ошибка в некритическом модуле, например в сервисе информационной поддержки или мультимедийном компоненте, теоретически может повлиять на работу более значимых функций. Для V2X такая зависимость нежелательна: сервисы предупреждения о столкновении, проверки подлинности сообщений и локального моделиро-

вания дорожной обстановки должны быть изолированы от второстепенных функций.

Стоит также отметить, что V2X является гетерогенной средой. В ней взаимодействуют автомобили разных производителей, дорожные контроллеры, RSU, МЕС-узлы, мобильные устройства пешеходов и облачные платформы. V2X-сервисы используют разные типы связи: V2V, V2I, V2N, V2P и другие и, самое главное – разные сервисы имеют разные требования к задержке. Предупреждение об опасности требует максимально быстрой, тогда как загрузка карт или диагностических данных может быть отложена.

Преимущества и недостатки микросервисной архитектуры

Микросервисная архитектура предполагает разделение системы на небольшие независимые сервисы, каждый из которых отвечает за ограниченную функцию и взаимодействует с другими сервисами через стандартизированные интерфейсы. В контексте V2X это означает, что обработка сообщений, криптографическая проверка, локальная динамическая карта, взаимодействие с МЕС, предупреждение об опасностях, работа с инфраструктурой и дополнительные информационные функции могут быть реализованы как отдельные компоненты.

Главное преимущество микросервисов – это изоляция функций. Критические сервисы безопасности могут быть отделены от сервисов комфорта, аналитики или информационного сопровождения. Это снижает риск каскадных отказов и позволяет задавать для разных компонентов разные уровни приоритета. В V2X-системах протоколы, типы сообщений, требования безопасности и сценарии взаимодействия постоянно развиваются. Микросервисная архитектура позволяет обновлять отдельный сервис, например обработчик сообщений коллективного восприятия или модуль криптографической проверки, без полной перепрошивки всей системы. Это также позволяет интегрировать решение различных производителей в более гибком формате.

При помощи микросервисов, можно распределить функции между разными участниками взаимодействия в зависимости от разных факторов таких, как времени, нагрузка и др. Так, часть функций должна выполняться непосредственно на борту автомобиля, поскольку зависит от минимальной задержки и должна работать даже при отсутствии связи. Другие функции могут быть перенесены на МЕС-узел или в облако [3]. Например, первичное предупреждение о столкновении должно оставаться локальным, а тяжелая

аналитика дорожной ситуации или агрегация данных от множества участников может выполняться на периферийной инфраструктуре. Из этого складывается еще одно преимущество – масштабируемость. В зависимости от дорожной ситуации отдельные сервисы могут получать больше или меньше вычислительных ресурсов. В плотном трафике возрастает нагрузка на обработку V2X-сообщений. При движении по трассе может активироваться сервис «platooning» (транспортная технология, предполагающая движение колонны автомобилей, управляемых лишь одним водителем), а при въезде в зону парковочной инфраструктуры – сервис взаимодействия с зарядными станциями или автоматический парковщик.

Интеграция микросервисов в V2X-системах должна учитывать три уровня: бортовой (OBU), инфраструктурный (RSU/mRSU) и облачный (CLOUD) [4].

На бортовом уровне микросервисы взаимодействуют с электронными блоками управления, датчиками, коммуникационными модулями и системами помощи водителю. Здесь особенно важны предсказуемость задержек, безопасность и совместимость с автомобильными стандартами.

На инфраструктурном уровне микросервисы работают на RSU и дорожных контроллерах. Они могут агрегировать данные от нескольких транспортных средств, передавать предупреждения, управлять сообщениями от светофоров, обеспечивать локальную координацию дорожной ситуации [5].

На облачном уровне важную роль играют МЕС-узлы. Они позволяют размещать вычислительные сервисы ближе к источнику данных, снижая задержку по сравнению с централизованным облаком. В V2X это особенно важно для коллективного восприятия, локальной аналитики дорожной ситуации и координации транспортных потоков.

При проектировании микросервисов для V2X, следует абстрагироваться от конкретных радиотехнологий. Прикладные микросервисы не должны напрямую зависеть от конкретного радиоинтерфейса [6]. Между приложениями и коммуникационным оборудованием необходим промежуточный слой (middleware), который преобразует данные в стандартизированные форматы сообщений и скрывает особенности конкретного модема или сетевого стека.

В качестве основы для приоритизации принято использовать четыре критерия [7]:

1. Критичность для безопасности движения.

2. Требования к задержке.
3. Зависимость от локального исполнения.
4. Ресурсная нагрузка.

На основе этих критериев микросервисы можно разделить на четыре приоритетных уровня.

К первому приоритету относят обязательные критические сервисы. Они должны работать локально, иметь гарантированные ресурсы и не отключаться при перегрузке системы. К ним относятся сервисы предупреждения о столкновении, базовой осведомленности, проверки подлинности сообщений, локальной динамической карты и оценки риска.

Второй приоритет подразумевает сервисы расширенной безопасности и коллективного восприятия. Они повышают качество восприятия дорожной ситуации, но могут частично распределяться между OBU, RSU и MEC. К ним относятся коллективное восприятие, обработка инфраструктурных сообщений, координация маневров и часть функций сбора данных с сенсоров (sensor fusion).

К первому приоритету относят сервисы эффективности движения. Они улучшают транспортный поток, но не всегда являются критичными для немедленной безопасности. Сюда относятся GLOSA, управление приоритетом проезда, platooning и оптимизация маршрутов.

Четвертый приоритет – это информационные и сервисные функции. Они могут быть ограничены, отложены или перенесены в облако при дефиците ресурсов. Сюда относятся обновление карт, диагностика, погодная информация, парковочная инфраструктура, мультимедиа и пользовательские сервисы.

Такая модель приоритизации позволяет реагировать на динамику V2X среды. При нормальных условиях работают все сервисы одновременно, загрузка сервисов осуществляется по необходимости. При перегрузке сети, нехватке вычислительных ресурсов или перегреве оборудования сначала ограничиваются второстепенные функции, затем сервисы эффективности, но критическое ядро безопасности сохраняет работоспособность.

Несмотря на преимущества, микросервисная архитектура не является универсальным решением. Она повышает сложность проектирования, мониторинга и отладки. Если границы сервисов выбраны неправильно, система может начать делать большое количество сетевых вызовов между сервисами, что увеличивает задержку и снижает эффективность.

Другой риск связан с согласованностью данных. В традиционной системе данные часто хранятся централизованно, тогда как в микросервисной архитектуре каждый сервис может владеть собственными данными. Для систем V2X это требует аккуратного проектирования событийной модели, правил синхронизации и механизмов восстановления после сбоев, поднимая актуальный вопрос интероперабельности. С точки зрения безопасности, увеличение числа сервисов и интерфейсов расширяет область уязвимости от внешних атак на систему. В этой связи микросервисная V2X-архитектура должна включать аутентификацию межсервисного взаимодействия, шифрование, проверку сертификатов, контроль доступа, мониторинг угроз и механизмы обнаружения некорректного поведения.

Заключение

Внедрение микросервисной архитектуры в системы V2X является неизбежным этапом развития интеллектуальных транспортных систем. Переход к микросервисной архитектуре в V2X-системах является фундаментальным сдвигом, позволяющим превратить транспортную инфраструктуру в гибкую, интеллектуальную и безопасную цифровую среду. Успех этого перехода зависит от гармонизации стандартов связи, развития граничных и туманных вычислений и создания надежных механизмов, отвечающих за безопасность, способных работать в динамичной среде современного дорожного движения.

Список используемых источников

1. Волков А. Н. Задача маршрутизации в сети динамических туманных вычислений // Труды учебных заведений связи. 2024. Т. 10. № 4. С. 27–37.
2. Kalske M., Mäkitalo N., Mikkonen T. Challenges when moving from monolith to microservice architecture // International Conference on Web Engineering. 2017. P. 32–47.
3. Tu N. D., Elgendy I.A., Khakimov A., Muthanna A., Kochetkova I., Samouylov K., Koucheryavy A. Cross-layer multipath routing for live microservice migration in fog computing networks // IEEE Access. 2026. Vol. 14. PP. 46671–46686.
4. Vladiko A., Plotnikov P., Tambovtsev G. Simulation-based evaluation of V2X system with variable computational infrastructure // Network. 2025. Vol. 5. Iss. 1. P. 4.
5. Tambovtsev G. I., Plotnikov P. V., Vladiko A. G., Deep Reinforcement Learning for Mobile RSU Orchestration in Urban V2X Networks // 2026 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications. 2026. P. 1-6.
6. Bottazzi M., Wesemeyer D., Bargmann M., Ruppe S. DLR V2X Software Framework: A CCU-agnostic solution for transceiving V2X messages // ITS World Congress. 2021.
7. Alzahrani M. A., Albassam E. Y. A Scalable Microservice Architecture for Autonomous IoT Systems in Smart Transportation: Integration of Edge Computing, Real-Time Processing, and Security // IEEE Access, 2026, Vol. 14. P. 78438–78460.

MICROSERVICE ARCHITECTURE IN V2X SYSTEMS

Vladyko A., Plotnikov P., Tambovtsev G.

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

The development of V2X (Vehicle-to-Everything) systems and intelligent transport systems (ITS) leads to the formation of a distributed computing environment in which data processing and decision-making are carried out at the level of vehicles, road infrastructure and peripheral computing nodes. In this regard, the microservice architecture is considered as a promising approach to building software systems, providing modularity, scalability and deployment flexibility. The paper provides an overview and systematization of services used in the V2X environment, focusing on their functional role, requirements for delays and criticality to ensure road safety. It is proposed to classify services by priority levels and placement requirements.

The work is aimed at forming a holistic view of the structure of microservices in V2X and identifying key requirements for their placement on ITS distributed computing systems.

Key words: *Vehicle-to-Everything, V2X, microservice architecture, intelligent transport systems*

УДК 550.385.4

ГРНТИ 10.19.61

О ДИНАМИКЕ АКТИВНОСТИ ГЕОМАГНИТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ ЗА 2022 – 2026 РАДИОГОДЫ

В. А. Волостных, П. В. Воробьев, Д. Ф. Ткачев

Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного

В статье рассмотрена динамика изменений активности геомагнитных возмущений природного характера, влияющих на функционирование магистральных коротковолновых радиолиний за последние три года. Оценка проводилась по основным показателям характеристик геомагнитных возмущений. Результаты исследований могут быть использованы при планировании магистральной коротковолновой радиосвязи и прогнозировании состояния радиосвязи. Разработанные материалы могут быть полезны студентам и курсантам, обучающимся по специальности радиосвязь и радиовещание.

анализ ионосферных возмущений, геомагнитные возмущения, динамика активности, магистральная коротковолновая радиосвязь, магнитная буря, радиогод, солнечная активность

Из средств массовой информации известно, что 2023 – 2025 годы характеризовались систематическими магнитными бурями (МБ), вызванными повышенной солнечной активностью. Известно, что магнитные бури – геомагнитные возмущения (ГМВ) – оказывают существенное влияние на состояние ионосферы и, следовательно, на возможность обеспечения радиосвязи ионосферной волной в коротковолновом (КВ) диапазоне [1-7].

Анализ [1, 4] показал, что в период повышенной солнечной активности магнитный ветер, достигая ионосферы вокруг Земли, влияет на ее свойства, определяющие ее способность «отражать» радиоволны определенных поддиапазонов радиочастот, что вызывает смещение диапазона максимально применимых и наименее применимых радиочастот (МППЧ и НППЧ) для каждой радиолинии (магистральной). Данные обстоятельства послужили основанием для продолжения исследований данной темы.

Авторами проводились наблюдения за состоянием распространения радиоволн в радилюбительских диапазонах по сигналам любительских радиостанций [6, 7]. Однозначно установлено, что при ГМВ уровня U_5 и выше (по девятибалльной шкале), распространение радиоволн КВ диапа-

зона существенно изменяется – сигналы дальних корреспондентов становятся на уровне шумов, но шумы эфира значительно возрастают, и кроме того, появляются сигналы радиостанций, расположенных в так называемой мертвой зоне, но затем и они исчезают. При значениях уровня ГМВ = 7 и выше прохождение радиоволн на магистральных радиопутьях существенно затруднено и в большинстве случаев невозможно, что подтверждается теоретическими трудами и практическими наблюдениями [1, 5, 9].

В целях определения вероятности событий, при которых магистральная радиосвязь будет затруднена или невозможна, проведен анализ характеристик ГМВ и динамики их изменений. С целью практического применения исследований анализ проведен по сезонам радиогода за период с марта 2023 года по май 2026 года, т.е. более чем за три последних года.

В соответствии с изложенным анализ воздействия ГМВ проведен:

- для 1 сезона радиогода за период с 1 марта по 6 мая;
- для 2 сезона радиогода за период с 7 мая по 31 августа;
- для 3 сезона радиогода за период с 1 сентября по 31 октября;
- для 4 сезона радиогода за период с 1 ноября по 28 февраля.
- для радиогода в целом за период с 1 марта по 28 февраля.

Оценка ГМВ была проведена по показателям, предложенным в [7, 8].

В качестве показателей, характеризующих ГМВ использовались следующие:

$N_{(y < y_{\text{зад}})}^{jc}$ – количество ГМВ в j -ом сезоне радиогода, уровня не ниже заданного, ед;

$t_{(y < y_{\text{зад}})}^{jc}$ – среднее значение продолжительности ГМВ в j -ом сезоне радиогода, уровня не ниже заданного, в часах;

$K_{в(y < y_{\text{зад}})}^{jc}$ – коэффициент воздействия ГМВ уровня не ниже заданного, на обеспечение радиосвязи ионосферной волной в j -ом сезоне радиогода, в %.

Коэффициент воздействия ГМВ на состояние радиосвязи рассчитывался по формуле:

$$K_{в(y \geq y_{\text{зад}})}^{jc} = \frac{t(y \geq y_{\text{зад}})}{T_{jc}} \cdot 100 \%,$$

где T_{jc} – продолжительность сезона радиогода, часы.

Поскольку основная цель исследований заключалась в оценке динамики изменений ГМВ, влияющих на распространение радиоволн КВ диапазона, то авторы полагали целесообразным оценку проводить для ГМВ $U_{\text{ГМВ}}$

≥ 5 (ухудшение ведения радиосвязи) и для $U_{ГМВ} \geq 7$ (существенное затруднение ведения радиосвязи или невозможность ее проведения).

В качестве исходных данных для расчетов использовались материалы Лаборатории солнечной астрономии Института космических исследований (ИКИ) РАН публикуемые в [10, 11], вычисления показателей проводилось по методикам изложенным в [7-10], а результаты вычислений представлены в таблицах 1 и 2 соответственно. Поскольку основной целью исследования являлось выявление тенденций изменения ионосферных возмущений, то данные в таблицах приведены в несколько округленном виде и не являются результатом точных вычислений.

ТАБЛИЦА 1. Динамика активности ГМВ за 2023 – 2026 радиогоды для уровня ГМВ = 5 и более ($U_{ГМВ} \geq 5$).

Сезон РГ	Показатель характеристик ГМВ	Радиогод (РГ)			
		2023-2024	2024-2025	2025-2026	2026-н.в.
У _{ГМВ} ≥ 5 (ухудшение магистральной радиосвязи)					
1	Кол-во ГМВ – N, ед	7	9	13	11
	Т _{средн} , час	6	6	6,9	26,5
	К _{возд} , %	2,5	3	5,5	18
2	Кол-во ГМВ – N, ед	11	21	15	
	Т _{средн} , час	6	8,14	6,4	
	К _{возд} , %	2,3	6	3,4	
3	Кол-во ГМВ – N, ед	7	14	14	
	Т _{средн} , час	4,8	12,2	1,5	
	К _{возд} , %	2,2	11,6	1,4	
4	Кол-во ГМВ – N, ед	23	8	24	
	Т _{средн} , час	6	16,9	10,8	
	К _{возд} , %	4,7	0,4	9	
За РГ	Кол-во ГМВ – N, ед	48	51	66	
	Т _{средн} , час	5,7	10,8	6,4	
	К _{возд} , %	3	5,88	4,8	

ТАБЛИЦА 2. Динамика активности ГМВ за 2023-2026 радиогоды
для уровня ГМВ = 7 и более ($U_{ГМВ} \geq 7$)

Сезон РГ	Показатель характеристик ГМВ	Радиогод (РГ)			
		2023-2024	2024-2025	2025-2026	2026-н.в.
		$U_{ГМВ} \geq 7$ (существенное ухудшение магистральной радиосвязи)			
1	Кол-во ГМВ – N, ед	-	-	1	-
	Тсредн, час	-	-	3	-
	Квозд, %	-		0,8	-
2	Кол-во ГМВ – N, ед	-	3	2	
	Тсредн, час	-	12	10	
	Квозд, %	-	1,3	0,7	
3	Кол-во ГМВ – N, ед	-	3	-	
	Тсредн, час	-	11	-	
	Квозд, %	-	2,2	-	
4	Кол-во ГМВ – N, ед	1	-	4	
	Тсредн, час	3		7,5	
	Квозд, %	0,1		0,1	
За РГ	Кол-во ГМВ – N, ед	1	6	7	
	Тсредн, час	3	11,5	5,1	
	Квозд, %	-	0,79	0,4	

Примечание: уровень 5 – умеренная геомагнитная буря; уровень 6 – сильная геомагнитная буря; уровень 7 – жесткий геомагнитный шторм; уровень 8 – экстремальный шторм.

Анализ данных о геомагнитных возмущениях показал, что в год максимальной солнечной активности (рис. 1) число возмущений уровня не ниже 5 ($U \geq U_5$) может быть более 50 при средней продолжительности 10,8 часов. Коэффициент воздействия ГМВ на магистральную КВ радиосвязь может достигать $K_{возд} > 5$ %. При этом наибольшее воздействие на радиосвязь, ГМВ будут оказывать во-вторых и четвертых сезонах радиогода.

Геомагнитные возмущения уровня 7 и более были также в годы максимальной солнечной активности, количество ГМВ в году может достигать 7 при средней продолжительности 11 часов, а коэффициент воздействия ГМВ на радиосвязь может достигать 0,8 %. Наиболее вероятны воздействия также во 2 и 4 сезонах радиогода.

При использовании представленных в таблицах данных, необходимо учитывать следующие обстоятельства.

1. Данные, полученные по ежемесячным прогнозам, которые, как показывает практика, не всегда сбывались. Был ряд эпизодов, когда уровень реальных ГМВ превышал данные по прогнозам. Кроме того, в работе использованы данные, касающиеся Северо-Западного региона Российской Федерации.

2. Показатель среднего времени ГМВ носит слишком усредненное значение, так как, во-первых, все исходные данные о продолжительности ГМВ идут в трехчасовом измерении, а во-вторых, слишком велик разброс значений – в ряде случаев ГМВ продолжается 3 часа, а в некоторых случаях продолжается более суток.

3. Очевидно, что продолжительность наблюдения и оценок недостаточна, для выявления закономерностей ГМВ, из чего следует необходимость продолжения данных исследований.

4. Можно считать целесообразным разработку методик автоматизированных оценок не по прогнозам, а по реальным данным о ГМВ и продолжение исследований по данной теме с более точными результатами в течение всего 11-летнего цикла солнечной активности.

Известно, что ГМВ определяются солнечной активностью, и подчиняются закономерностям 11-летнего цикла. Исследуемый период ГМВ попадает на максимум солнечной активности этого цикла (рис. 1) и представляется целесообразным такие исследования продолжить, чтобы получить полную картину динамики ГМВ, что позволит планировать работу магистральных КВ радиолиний и систем КВ радиовещания на значительную перспективу

Полученные характеристики ГМВ могут быть использованы для прогнозирования и расчета показателей обеспечения магистральной коротковолновой связи и выработке мероприятий по обеспечению устойчивой магистральной коротковолновой связи.

Циклы солнечной активности

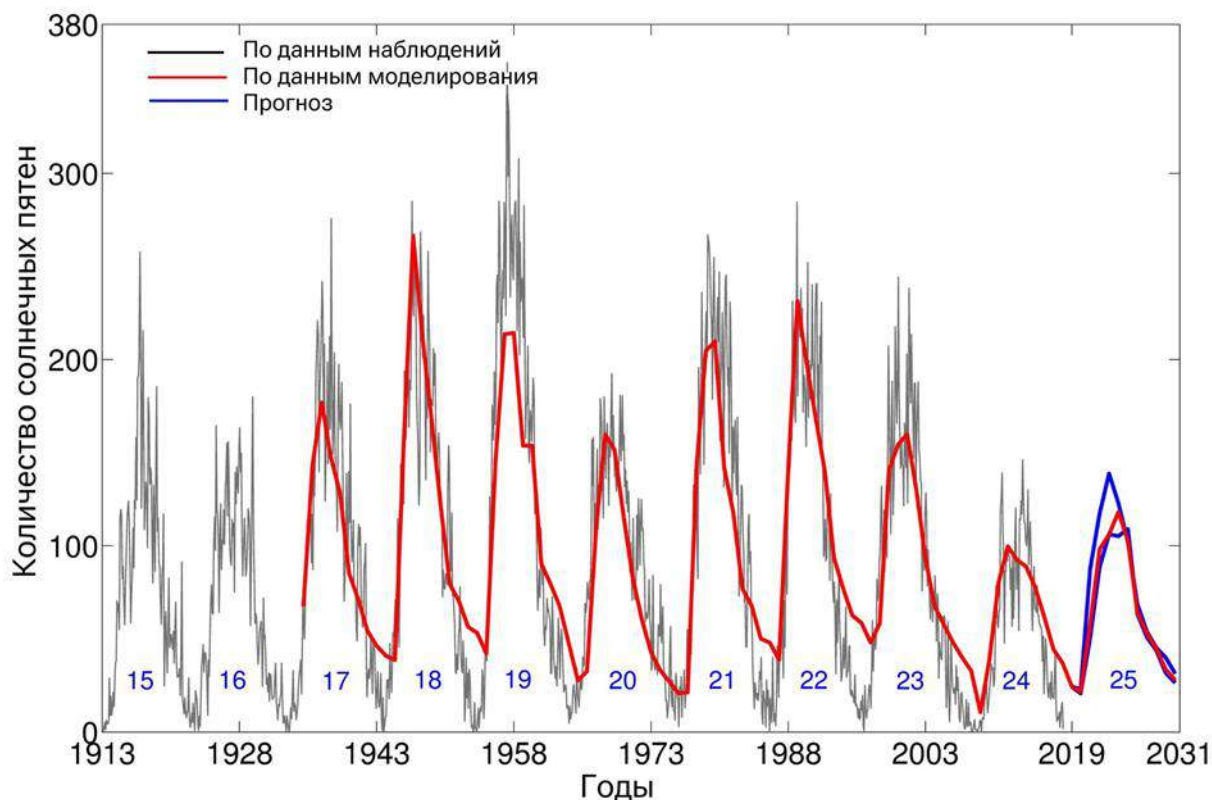


Рис. 1. График циклов солнечной активности

В заключение, можно сделать следующие выводы:

1. Полученные данные можно использовать для выработки мероприятий по обеспечению устойчивой магистральной коротковолновой радиосвязи.
2. Несмотря на значительное количество материалов, посвященных исследованию влияния магнитных бурь на распространение радиоволн КВ диапазона, в связи с недостаточной предсказуемостью солнечной активности, можно считать целесообразным продолжение исследований в данном направлении. Представляется целесообразным продолжить изучение характера изменения ГМВ в течение цикла солнечной активности и разработать методику оценки влияния ГМВ на обеспечение магистральной КВ радиосвязи, а в последующем получить данные о реальном о влиянии ГМВ на обеспечение магистральной радиосвязи и оценке эффективности радиовещания в коротковолновом диапазоне волн.

Список используемых источников

1. Мейнке Х. и Гундлах Ф. В. Радиотехнический справочник. Том 1. Радиодетали. Цепи с сосредоточенными параметрами. Линии передачи. Волноводы. Резонаторы. Антенны. Распространение радиоволн. Перевод с немецкого. Государственное энергетическое издательство Москва. 1960 г. Ленинград. С. 416.
2. Серков В. П. Распространение радиоволн и антенные устройства. Учебное пособие. Л.: ВАС, 1981, 468 с., ил.
3. Ротхаммель К., Кришке А. Антенны. Том 1.: Пер. с нем. Мн: ОМО «Наш город», 2001. 416 с.: ил.
4. Котова Д. С., Клименко В. В., Клименко М. В., Захаров В. Е. Численное моделирование влияния геомагнитной бури 2 – 3 мая 2010 года на распространение коротких радиоволн в ионосфере. / Известия вузов. Радиофизика. 2014. № 7. С. 520-530.
5. Благовещенский Д. В., Сергеева М. А., Воздействие магнитных бурь на нижнюю ионосферу в авроральной зоне. / Солнечно-земная физика. 2015. Том 1 № 3. С. 3-10.
6. Куркин В. И., Полех Е. М., Золотухина Н. А. Влияние слабых магнитных бурь на характеристики распространения КВ-радиоволн. / Геомагнитизм и аэрономия, 2022. Т. 62. № 2. С. 245-256.
7. Волостных В. А., Стародубцев Ю. И., Ткачев Д. Ф. Влияние магнитных бурь на распространение радиоволн коротковолнового диапазона// Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2024). Материалы XIII Международной научно-технической и научно-методической конференции. В 4-х томах. СПб.: СПбГУТ, 2024. С. 36-42.
8. Волостных В. А., Воробьев П. В., Ткачев Д. Ф. Мониторинг декаметрового диапазона радиоволн // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2024). Материалы XIII Международной научно-технической и научно-методической конференции. В 4-х томах. Санкт-Петербург, 2024. С. 104-108.
9. Абчук В.А. и др. Справочник по исследованию операций/Под общ. ред. Ф. А. Матвейчука – М.: Воениздат, 1979. 368 с. ил.
10. Заморока А. Н. Основы любительской радиосвязи. Справочное пособие для начинающих радиолюбителей-коротковолновиков. 8-е изд., перераб. и доп. М.: «Издание книг ком», 2020. 402 с., ил.

**ABOUT THE DYNAMICS OF GEOMAGNETIC DISTURBANCE ACTIVITY
FOR THE 2022–2026 RADIO YEARS****Vorobyev P., Volostnyh V., Tkachev. D.**Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union
S. M. Budyonny

This article examines the dynamics of changes in the activity of natural geomagnetic disturbances affecting the operation of long-haul shortwave radio links over the past three years. The assessment was conducted using key geomagnetic disturbance characteristics. The research results can be used in planning long-haul shortwave radio links and forecasting the state of radio communications. The developed materials may be useful for students and cadets studying radio communications and broadcasting.

Key words: *ionospheric disturbance analysis, geomagnetic disturbances, activity dynamics, shortwave radio communication, magnetic storm, radio year, solar activity*

УДК 004.932.2

ГРНТИ 28.23.15

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ГРАФИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ СРЕДСТВАМИ ЧАСТОТНЫХ ПОРТРЕТОВ

П. А. Волынкин, А. С. Четверухин

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

До недавнего времени автором было введено понятие частотных портретов (ЧП) для текстовых объектов, что позволяет идентифицировать авторство подобных объектов. Теперь же предлагается исследовать возможность разработки и применения ЧП для рисованных картин тех или иных художников, произведения которых известны и оцифрованы. На начальной стадии решения этой задачи исследуются методы, имеющие возможность обрабатывать и анализировать максимально важные параметры визуальных объектов.

компьютерное зрение, определение авторства, частотные портреты, параметры изображений

Интенсивное развитие современных технологий анализа и синтеза визуальной информации требует совершенствования алгоритмов компьютерного зрения. Среди задач, связанных с визуальной информацией, созданной в ходе творческой работы художника, сложнее всего не просто распознать картину, а выяснить, кто является ее автором. Особенно, если речь об уникальном творческом почерке конкретного человека.

Когда оцифровывают музейные коллекции, объем графики резко растет, и ее нужно систематизировать, группировать, приписывать авторам. Это нужно в том числе и для судебной экспертизы, и для борьбы с подделками.

Раньше подобные задачи решали вручную, полагаясь на личный опыт и интуицию. Однако это вело к субъективным ошибкам, а сам процесс был утомительным и плохо воспроизводимым. Специалистов стало катастрофически не хватать, а учить их было долго и дорого. Поэтому нужны модели и программы на базе компьютерного зрения и машинного обучения, которые могли бы решать подобные задачи.

Подобная задача, только для текстовых объектов, решалась ранее [1, 2]. В ходе этой работы было введено понятие «частотных портретов» авторов

[3, 4]. Теперь же для произведений художников предлагается исследовать возможность также использовать понятие «частотный портрет», как каждого отдельного произведения, так и группы произведений одного автора – «частотный портрет автора». Такой портрет формируется статистическими методами и компьютерным зрением на базе большой оцифрованной подборки работ того же автора. Для многих художников можно построить подобные частотные портреты. Если затем взять неизвестное произведение неизвестного художника (при допущении, что в банке данных частотных портретов авторов данный автор уже имеется) и сравнить частотный портрет такого анонимного произведения, то, возможно, что, с определенной вероятностью, можно определить автора этого произведения.

Для начала требуется определить, какие факторы художественного произведения могут обладать отличительными признаками того или иного автора. Как минимум, таковыми являются как характерные для определенного художника типичные для него цветовая гамма и сочетания цветов, так и особенности формирования контуров, фактура картины, степень размытости изображения, способы нанесения мазков.

Для проведения анализа вышеупомянутых факторов выбраны следующие методы:

- *Глобальное преобразование Фурье*. Оно применяется сразу для всего изображения, что позволяет выделить частоты и оценить степень вклада различных пространственных частот.
- *Локальное (в окне) преобразование Фурье*. Этот метод применяется для учета неоднородности фрагментов изображения.
- *Вейвлет-преобразование*. Данный метод позволяет учесть как частоты, так и их расположение на картине. Здесь имеет место разложение на низкочастотную аппроксимацию и высокочастотные детали. Фактически, в этом методе формируется каскад фильтров.
- *Метод доминирующих цветов*. В этом методе происходит формирование кластеров цветового пространства с последующим анализом кластеров и доли каждого кластера в исследуемом объекте.
- *Оценка границ и размытости*. В этом методе производится оценка средней величины градиента по Собелю и плотность контуров по Кэнни.

В итоге, все вышеупомянутые методы представляют единый вектор, который и является частотным портретом данной картины.

Далее будем рассматривать визуальные данные в качестве сложной системы, в которой:

- изображение состоит из связанных элементов;
- эти связи между элементами изображения скрыты и простыми правилами их не описать;
- связи между элементами имеют нелинейный характер.
- авторский стиль не очевиден, его можно выявить только математическими методами;

Фактически, автора картины будем рассматривать в качестве своего рода источника «динамического процесса». Подобный динамический процесс начинается с момента начала написания картины. В результате, этот процесс формирует набор выходных данных: цветовые паттерны, плотность спектра, распределение частот, локальные текстуры, а также статистику расположения элементов.

Для описания этого динамического процесса создается модель, состоящая из 5 модулей:

1. Модуль создания Частотного портрета (ЧП) конкретного художественного произведения.
2. Модуль создания базы данных частотных портретов отдельных произведений данного автора.
3. Модуль создания Частотного портрета определенного автора на базе набора частотных портретов его произведений.
4. Модуль создания Базы данных частотных портретов авторов.
5. Модуль определения автора неизвестной картины путем статистического анализа при сравнении ЧП неизвестного произведения с имеющимися частотными портретами авторов.

Данная модель имеет иерархическую структуру, где каждый из модулей (кроме первого) опирается на модель более низкого уровня.

Список используемых источников

1. Волынкин П. А. Частотные портреты в идентификации авторства // Волновая электроника и инфокоммуникационные системы. XXIV Междунар. науч. конф. (СПб., 31 мая – 4 июня 2021 г.): сб. статей: в 3 ч. СПб.: ГУАП, 2021. Ч. 3. С. 46-51.
2. Волынкин П. А., Гянджиев Э. Э. Частотные портреты и методы их формирования // Наука и образование, сб. статей XV Межд. научно-практической конференции, Наука и просвещение, 2018. С. 49-55.
3. Волынкин П. А., Гянджиев Э. Э. Идентификация авторства текста при помощи частотных портретов // Наука и образование: сб. ст. XV Междунар. науч.-практ. конф. 2018. С. 150-155.
4. Волынкин П. А., Гянджиев Э. Э. Исследование методов формирования частотных портретов. // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании,

VII Международная научно-техническая и научно-методическая конференция. СПб.: СПбГУТ, 2018. С. 195-202.

IDENTIFICATION OF GRAPHIC OBJECTS USING FREQUENCY PROFILES

Volynkin P., Chetverukhin A.

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

Until recently, one of the authors introduced the concept of frequency profiles for textual objects, which makes it possible to identify the authorship of such objects. Now, we propose to explore the possibility of developing and applying frequency profiles for graphic objects created by various authors whose works are already available. At this stage of the work, groups of methods are being outlined that are capable of accounting for the most significant parameters of graphic objects.

Key words: *computer vision, authorship identification, frequency profiles, image analysis*

УДК 621.396; 004.8
ГРНТИ 49.43.29; 28.23.37

ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМА ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗНЕСЕНИЯ С НИЗКОЙ СЛОЖНОСТЬЮ НА ОСНОВЕ НЕЙРОСЕТЕВОГО ПРЕДИКТОРА

З. Т. Ву, Е. И. Глушанков, К. К. Фам

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В статье решается проблема высокой вычислительной сложности адаптивного метода оптимального сложения (Maximal Ratio Combining, MRC) в системах SIMO. Предложен алгоритм оптимального приема на базе нейронной сети, выступающей в роли предиктора числа активных антенн по извлеченным признакам канала. Результаты моделирования доказывают, что предложенный алгоритм обеспечивает снижение вычислительных затрат при сохранении требуемой помехоустойчивости в условиях замираний канала и высокой пространственной корреляции.

система SIMO, метод оптимального сложения, энергоэффективность, вычислительная сложность, нейронная сеть, пространственная корреляция

В системах беспроводной связи с одной передающей и несколькими приемными антеннами (Single-Input-Multiple-Output, SIMO) важную роль играют методы пространственного разнесения [1]. Среди традиционных методов, таких как автовыбор и сложение с равными весами, наивысшую эффективность демонстрирует метод оптимального сложения (Maximal Ratio Combining, MRC). Высокая производительность данного метода достигается за счет когерентного сложения сигналов от N_R приемных антенн с весовыми коэффициентами, пропорциональными параметрам канала [2]. Однако классический алгоритм MRC предполагает постоянное использование всех доступных антенных ветвей независимо от условий связи. Такой подход является неэнергоэффективным и приводит к избыточному энергопотреблению, поскольку в условиях благоприятного состояния канала требуемое качество обслуживания по критерию вероятности битовой ошибки (Bit Error Rate, BER) может быть достигнуто с использованием значительно меньшего числа антенн.

Для разрешения данного противоречия в ряде исследований были предложены алгоритмы выбора антенн, базирующиеся на оценке качества принимаемого сигнала (например, по критерию максимума выходного отношения сигнал/шум, или минимума BER) [3]. Данное направление

в следующей части этой работы обозначено как адаптивный метод оптимального сложения (Adaptive-MRC). Указанный подход успешно решает задачу повышения энергоэффективности радиочастотного тракта, активируя лишь строго необходимое число антенн. Тем не менее, алгоритм Adaptive-MRC порождает проблему – возрастание вычислительной сложности, что обусловлено необходимостью итеративного повторения ресурсоемких процедур обработки сигнала.

Целью работы является оптимизация процесса адаптивного приема. В статье предлагается усовершенствованный алгоритм Optimal-MRC, использующий искусственную нейронную сеть для принятия мгновенного решения о необходимом количестве активных антенн. Предлагаемый подход позволяет полностью исключить вычислительно затратный итеративный цикл, присущий классическому методу Adaptive-MRC.

Математическая модель системы SIMO. В данной работе рассматривается система беспроводной связи с одним передающим и N_R приемными антеннами. Вектор принятого сигнала y описывается следующим выражением:

$$y = hx + n,$$

где x – передаваемый информационный символ, h – векторный канал, n – вектор аддитивного белого гауссовского шума.

В данной работе элементы вектора h моделируются как случайные величины, подверженные рэлеевским замираниям. Для учета эффекта пространственной корреляции, возникающего, когда приемные антенны расположены близко друг к другу, вектор коррелированного канала формируется как $h = R^{1/2} h_w$, где h_w – вектор независимых рэлеевских замираний, а R – пространственная корреляционная матрица ковариации. В работе используется модель Теплица [4], элементы которой определяются как:

$$R_{i,j} = \rho^{|i-j|}, \quad 1 \leq i, j \leq N_R,$$

Где ρ – коэффициент корреляции между смежными антеннами.

Алгоритм MRC. Традиционный алгоритм MRC взвешивает сигнал с каждой i -ой приемной антенны весовым коэффициентом h_i^* . Выходной сигнал сумматора MRC определяется как [5]:

$$y_{MRC} = \sum_{i=1}^{N_R} h_i^* y_i,$$

где h_i^* – комплексно-сопряженный коэффициент передачи i -й антенны.

Несмотря на свою теоретическую оптимальность, классический MRC-алгоритм обладает фундаментальным недостатком – низкой энергетической эффективностью при использовании всех приемных антенн в любых условиях канала, поскольку при хороших условиях канала для достижения требуемой производительности можно было бы использовать меньшее количество антенн.

Алгоритм Adaptive-MRC. Для решения проблемы энергетической неэффективности алгоритма MRC был предложен алгоритм Adaptive-MRC. Его основная идея заключается в отказе от использования всех N_R антенн по умолчанию. Вместо этого алгоритм итерационно находит минимально необходимое количество антенн k_{opt} ($1 \leq k_{opt} \leq N_R$) [6]. Принцип работы алгоритма строится на последовательной активации. Система начинает работу с $k = 1$, после чего вычисляется текущий BER (этот процесс требует выполнения демодуляции и декодирования). Если полученное значение BER превышает заданный порог (например, 10^{-4}), система включает следующую по порядку антенну ($k_{opt} = k + 1$) и заново повторяет весь процесс обработки сигнала.

Недостаток Adaptive-MRC заключается в том, что он решает проблему энергопотребления, но создает проблему вычислительной сложности. В худшем случае при глубоких замираниях системе приходится выполнять ресурсоемкое итеративное декодирование до N_R раз. Это приводит к недопустимо высоким вычислительным затратам и существенным временным задержкам.

Предлагаемый алгоритм Optimal-MRC. Для устранения вычислительного недостатка, присущего классическому алгоритму Adaptive-MRC, в данной работе предлагается алгоритм Optimal-MRC, где итерационный процесс поиска k_{opt} заменяется на однократное предсказание с помощью предварительно обученной нейронной сети.

Для обеспечения высокой точности классификации при минимальной сложности самой нейронной сети вектор данных о состоянии канала преобразуется в компактное пространство информативных признаков. Пусть мгновенная мощность сигнала в i -й приемной ветви обозначается как p_i . Вектор признаков формируется из следующих компонентов:

1. Средняя мощность канала: $\mu_p = \frac{1}{N_R} \sum_{i=1}^{N_R} p_i$;
2. Дисперсия мощностей ветвей: $\sigma_p^2 = \frac{1}{N_R} \sum_{j=1}^{N_R} (p_j - \mu_p)^2$;
3. Отношение доминирования D_R : Отражает степень преобладания наиболее сильного луча над вторым по мощности и вычисляется как:

отношение мощности сильнейшей ветви ($P_{\text{sorted}, 1}$) к мощности второй по силе ветви ($P_{\text{sorted}, 2}$) $D_R = \frac{P_{\text{sorted}, 1}}{P_{\text{sorted}, 2}}$.

Обучение нейронной сети производится с учителем. В качестве «учителя» выступает классический алгоритм Adaptive-MRC, который автономно генерирует базу данных. Для каждого состояния канала классический алгоритм определяет минимальное количество антенн k_{opt} , при котором достигается целевой порог BER ($BER \leq 10^{-4}$). Данное значение k_{opt} используется в качестве истинной метки класса.

В качестве предиктора выбрана архитектура многослойного персептрона с прямой связью. Сеть состоит из входного слоя (8 нейронов), двух скрытых слоев (32 и 16 нейронов соответственно) и выходного слоя классификации (4 нейрона). В скрытых слоях применяется функция активации ReLU, а в выходном слое используется функция Softmax, преобразующая выходы сети в вектор вероятностей $\mathbf{p} = [p_1, p_2, \dots, p_{N_R}]$, где решением сети является индекс с максимальной вероятностью [7].

Для верификации предложенного алгоритма Optimal-MRC было проведено имитационное моделирование в среде MATLAB. В качестве базовой конфигурации рассматривалась система 1×4 SIMO в условиях многолучевого канала с рэлеевскими замираниями и пространственной корреляцией ($\rho = 0.75$). В качестве помехоустойчивого кода применялся низкоплотный код.

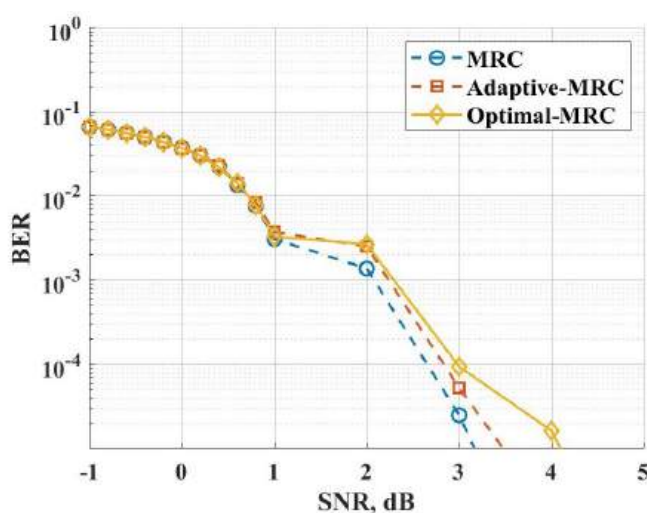


Рис. 1. Сравнение помехоустойчивости исследуемых алгоритмов пространственного разнесения

Результаты сравнения помехоустойчивости предложенных алгоритмов представлены на рис. 1. Из результатов на рис. 1 видно, что алгоритмы Adaptive-MRC и Optimal-MRC демонстрируют практически полное

совпадение на всем исследуемом диапазоне SNR по сравнению с традиционным алгоритмом MRC. На рис. 2 представлено сравнение количества используемых антенн (КИА) для методов Adaptive-MRC и Optimal-MRC при различных значениях SNR.

Таким образом, в настоящей статье решена актуальная научно-техническая задача устранения проблемы энергетической неэффективности классического MRC-приема. Доказано, что предложенный алгоритм Optimal-MRC на базе нейронной сети осуществляет мгновенное и точное предсказание оптимальной конфигурации приемного тракта по извлеченным признакам канала, обеспечивая тем самым снижение вычислительной сложности системы, строго сохраняя при этом требуемую помехоустойчивость в условиях коррелированных замираний.

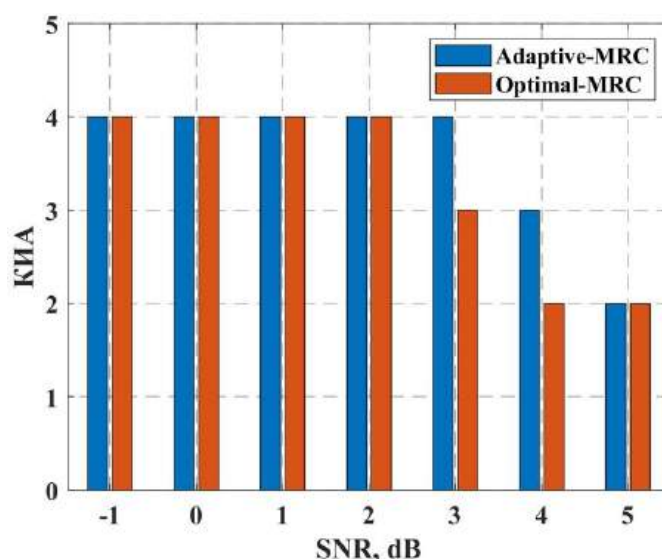


Рис. 2. Сравнение числа используемых антенн в зависимости от SNR для базового и предложенного алгоритмов

Список используемых источников

1. Якушенко С. А., Дворников С. В. Алгоритм выбора схемы MIMO-системы в радиолиниях с несколькими пространственными каналами // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2025. Т. 19. № 3. С. 24–36. DOI: 10.36724/2072–8735–2025-19-3-24-36.
2. Alcaraz López O.L., Alves H., Latva-aho M. Joint Power Control and Rate Allocation Enabling Ultra-Reliability and Energy Efficiency in SISO Wireless Networks // IEEE Transactions on Communications. 2019. Vol. 67. N 8. P. 5768-5782. DOI: 10.1109/TCOMM.2019.2914682.
3. Molisch A. F., Win M. Z. MIMO systems with antenna selection // IEEE Microwave Magazine. 2004. Vol. 5. N 1. P. 46-56. DOI: 10.1109/MMW.2004.1284943.
4. McNamara D. P., Beach M.A., Flertcher P. N. Spatial correlation in indoor MIMO channels // Proceedings of the 13th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and

Mobile Radio Communications (PIMRC). Lisbon: IEEE, 2002. Vol. 1. P. 290-294. DOI: 10.1109/PIMRC.2002.1046707.

5. Feng X., Tian F., Wang J et al. A survey on maximum ratio combination: applications, evaluation and future directions // Electronics. 2024. Vol. 13. N 15. article 3087. DOI: 10.3390/electronics13153087.

6. Фам К. К., Глушанков Е. И. Исследование методов разнесенного приема в радиоканалах с замираниями // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2025. Т. 13. № 3. DOI: 10.26102/2310-6018/2025.50.3.002.

7. Zhou Z., Niu Y., Wan B., Zhou W. Anti-Jamming Communication Using Imitation Learning // Entropy. 2023. Vol. 25, N 11. Article 1547. DOI: 10.3390/e25111547.

INVESTIGATION OF A LOW-COMPLEXITY SPATIAL DIVERSITY ALGORITHM BASED ON A NEURAL NETWORK PREDICTOR

Vu D., Glushankov E., Pham Q.

The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunication

This paper addresses the high computational complexity associated with the adaptive Maximal Ratio Combining (MRC) method in SIMO systems. We propose an optimal reception algorithm based on a neural network, which acts as a predictor for the number of active antennas utilizing extracted channel features. Simulation results demonstrate that the proposed algorithm significantly reduces computational overhead while maintaining the required error performance under conditions of channel fading and high spatial correlation.

Key words: SIMO systems, Maximal ratio combining, Energy efficiency, Computational complexity, Neural networks

УДК 621.391.15
ГРНТИ 49.03.05

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ГЛУБОКИХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ В ЗАДАЧАХ КАНАЛЬНОГО ДЕКОДИРОВАНИЯ

Т. З. Ву, Е. И. Глушанков, К. К. Фам

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В статье предлагается схема канального декодирования на базе глубоких нейронных сетей, призванная преодолеть вычислительные ограничения традиционных математических моделей. За счет сквозного машинного обучения и глубоких нелинейных преобразований, предложенная модель эффективно адаптируется к зашумленным каналам и с высокой точностью восстанавливает исходные сообщения. Результаты моделирования доказывают, что данный нейросетевой подход превосходит классические алгоритмы декодирования с жестким решением.

декодирование, машинное обучение, глубокая нейронная сеть

Обзор нейронных сетей

В современных системах связи традиционные алгоритмы канального декодирования зачастую ограничены жесткими математическими моделями. Сегодня в качестве мощной альтернативы все большее внимание привлекают глубокие нейронные сети (ГНС) [1]. Благодаря способности к сквозному обучению ГНС могут автоматически извлекать признаки из зашумленных сигналов, устраняя необходимость в сложном аналитическом проектировании и повышая гибкость системы.

Архитектура ГНС включает входной слой, несколько скрытых слоев и выходной слой. Наличие множества скрытых слоев существенно расширяет вычислительные возможности модели, позволяя ей выявлять сложные нелинейные зависимости в обрабатываемых данных. Сеть состоит из множества искусственных нейронов, соединенных между собой. Каждое соединение характеризуется обучаемыми параметрами: синаптическим весом (W) и коэффициентом смещения (b). Веса определяют силу связи между нейронами, а смещение сдвигает порог активации. Регулируя эти параметры в процессе обучения, сеть приобретает способность к точному распознаванию паттернов и прогнозированию.

Данный механизм базируется на алгоритме прямого распространения, который отвечает за последовательную передачу сигнала от входа к выходу. Если сеть состоит из M слоев, то математическое отображение передачи данных от слоя $l - 1$ к слою l ($1 \leq l \leq M$) имеет следующий вид:

$$x_l = h_l(x_{l-1}; \theta_l) = f(W_l x_{l-1} + b_l)$$

где x_{l-1} – выходные данные предыдущего слоя, $\theta_l = \{W_l, b_l\}$ – параметры текущего слоя l , а $f(\cdot)$ – функция активации.

На микроуровне, внутри каждого отдельного i -го нейрона, этот процесс начинается с вычисления линейной комбинации всех поступающих входных сигналов x_j : $z_i = \sum_{j=1}^n w_{ij} x_j + b_i$.

Сама по себе полученная взвешенная сумма z_i представляет собой результат линейного преобразования, вычислительные возможности которого не превышают возможностей обычной линейной регрессии и оказываются недостаточными для решения задач канального декодирования. По этой причине на втором этапе к взвешенной сумме применяется нелинейная функция активации, которая формирует итоговый отклик нейрона: $a_i = f(z_i)$. Выбор функции $f(\cdot)$ определяет качество прогнозирования сети; на практике ее выбирают исходя из архитектуры слоя и требуемого диапазона выходных значений. К наиболее распространенным функциям относятся [2]:

- сигмоида: $f(z) = \frac{1}{1+e^{-z}}$, диапазон $(0,1)$,
- гиперболический тангенс: $f(z) = \frac{e^z - e^{-z}}{e^z + e^{-z}}$, диапазон $(-1,1)$,
- ReLU: $f(z) = \max(0, z)$, диапазон $[0, +\infty)$,
- Softmax: $f(z_i) = \frac{e^{z_i}}{\sum_{j=1}^K e^{z_j}}$. Softmax применяется не к отдельному значению,

а ко всему вектору выходов слоя, преобразуя его в распределение вероятностей (диапазон $(0,1)$, сумма компонент равна 1), поэтому данная функция используется на выходном слое в задачах классификации.

Обучение нейронной сети сводится к количественной оценке ошибки с помощью функции потерь [3], после чего ее значение распространяется в обратном направлении через слои сети, что позволяет получить градиент функции потерь для каждого нейрона. Далее применяется алгоритм оптимизации, который обновляет матрицу параметров θ (включающую весовые коэффициенты и смещения) каждого нейрона. Обновление базируется

на вычисленном градиенте и заданном гиперпараметре – скорости обучения, с целью монотонного снижения общей ошибки системы [4]:

$$\theta_{new} = \theta_{old} - \eta \cdot \nabla_{\theta} E.$$

Для достижения приемлемой сходимости модели и минимизации ошибки процессы прямого и обратного распространения требуют выполнения значительного числа итераций (эпох обучения). В Таблице 1 представлены наиболее распространенные функции потерь и их соответствующие математические выражения. Следует отметить, что выбор оптимальной функции потерь, аналогично выбору функции активации, должен осуществляться адаптивно, строго исходя из характеристик распределения обучающей выборки и специфики решаемой задачи.

ТАБЛИЦА 1. Основные функции потерь

Название функции	Математическое выражение	Область применения
Среднеквадратичная ошибка (MSE)	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$	Задачи регрессии, оценка евклидова расстояния
Бинарная кросс-энтропия (BCE)	$-\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [y_i \ln(\hat{y}_i) + (1 - y_i) \ln(1 - \hat{y}_i)]$	Бинарная классификация, декодирование битов

Системная модель и нейросетевое декодирование

В рамках рассматриваемой модели системы связи исходный информационный вектор $t \in \{0,1\}^K$ преобразуется в кодовое слово $c \in \{0,1\}^N$ посредством умножения на порождающую матрицу $G_{K \times N}$, то есть $c = tG_{K \times N}$. Затем применяется двоичная фазовая манипуляция согласно отображению $\{0 \mapsto +1, 1 \mapsto -1\}$, формирующая вектор модулированных символов $x \in \{+1, -1\}^N$. Данный сигнал передается через канал с аддитивным белым гауссовым шумом (АБГШ), в результате чего на приемной стороне фиксируется зашумленный вектор $y = x + z$, где $z \sim \mathcal{N}(0, \sigma^2 I)$ – вектор гауссова шума с нулевым средним и ковариационной матрицей $\sigma^2 I$. Для практического доказательства эффективности применения ГНС в задаче восстановления сообщения t по вектору y , в работе рассматривается базовый сценарий с использованием кода Хэмминга (7, 4), где $N = 7$ и $K = 4$. При таком подходе традиционный процесс декодирования переформулируется

ется как задача многоклассовой классификации, для решения которой конструируется специализированная нейросетевая архитектура.

Разработанная модель ГНС принимает на входной слой 7-мерный вектор искаженного сигнала $y \in \mathbb{R}^7$. Далее данные проходят через каскад скрытых слоев, где линейные преобразования сопровождаются нелинейной функцией активации ReLU. Математически выход l -го скрытого слоя выражается как $h^{(l)} = \max(0, W^{(l)}h^{(l-1)} + b^{(l)})$, где $W^{(l)}$ и $b^{(l)}$ – матрица весовых коэффициентов и вектор смещений соответственно. Использование функции $\text{ReLU}(\cdot)$ позволяет сети эффективно извлекать скрытые признаки из сигнала и предотвращает проблему затухания градиента. Поскольку исходный информационный блок содержит $K = 4$ бита, общее число возможных уникальных сообщений составляет $2^K = 16$. Исходя из этого, выходной слой проектируется строго из $M = 16$ нейронов, каждый из которых репрезентует один из возможных информационных векторов t_m , где $m \in \{1, \dots, 16\}$. На финальном этапе применяется функция активации Softmax, вычисляющая апостериорную вероятность принадлежности сигнала к m -му классу: $P(\hat{t} = t_m | y) = \frac{\exp(z_m)}{\sum_{j=1}^{16} \exp(z_j)}$, где z_m – логиты выходного слоя. Итоговое решение принимается по критерию максимума апостериорной вероятности, то есть $\hat{t} = \underset{t_m}{\operatorname{argmax}} P(\hat{t} = t_m | y)$, что позволяет нейросети с высокой точностью выполнять роль канального декодера.

Результаты моделирования

Для проведения численного моделирования и оценки эффективности предложенного нейросетевого декодера используется порождающая матрица систематического классического кода Хэмминга (7, 4), заданная в виде:

$$G_{4 \times 7} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix}.$$

Ключевой особенностью экспериментальной установки является вычисление логарифмического отношения правдоподобия для каждого принятого символа, которое подается на вход сети вместо сырых отсчетов сигнала. Обучающая выборка формируется из $3 \cdot 10^5$ обучающих примеров, в условиях смешанного отношения сигнал/шум, равномерно распределен-

ного в широком диапазоне от 0 до 10 дБ. Учитывая описанную ранее общую архитектуру, детализируем конфигурацию скрытых слоев: модель включает три промежуточных слоя размерностью 128, 128 и 64 нейрона соответственно. В целях повышения аппроксимирующих свойств и предотвращения затухания градиента применяется функция активации ReLU.

На выходном слое, решающем задачу распределения вероятностей по 16 классам, в качестве целевой метрики минимизируется функция потерь перекрестной энтропии. Обновление параметров сети выполняется высокоэффективным адаптивным оптимизатором Adam [4] со стартовой скоростью обучения 10^{-3} . Процесс обучения занимает 35 эпох при размере мини-пакета в 4096 примеров. Для объективного анализа достигаемого выигрыша итоговая вероятность битовой ошибки (*абб. по англ.* BER – Bit Error Rate) предложенной ГНС сравнивается с двумя эталонными алгоритмами на тестовой выборке. В качестве базовой нижней границы рассматривается традиционное жесткое декодирование, базирующееся на поиске минимального расстояния Хэмминга после декодирования по критерию максимального правдоподобия, минимизирующее евклидово расстояние между принятым сигналом и всеми 16 валидными кодовыми словами.

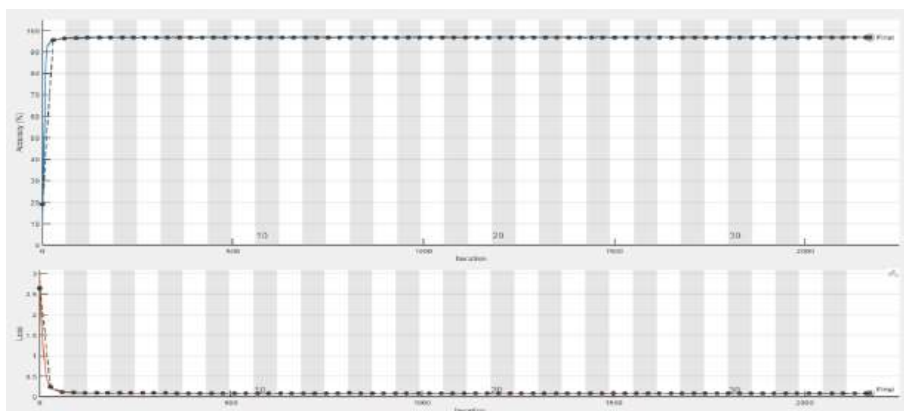


Рис. 1. Сходимость обучающих моделей

Обучение разработанной ГНС характеризуется устойчивой сходимостью. Как показано на рис. 1, точность валидации достигает 96.84 %, а функция потерь снижается до минимального значения уже на первых эпохах, после чего выходит на плато без заметных колебаний, что свидетельствует об отсутствии переобучения и корректной настройке весовых параметров сети. Полученная сходимость подтверждает адекватность обученной модели и служит основанием для дальнейшего сравнительного анализа ее эффективности по кривым вероятности битовой ошибки.

На рис. 2 зависимость BER от E_b/N_0 продемонстрировала, что предложенный нейросетевой декодер превосходит традиционный алгоритм жесткого решения, обеспечивая энергетический выигрыш свыше 1 дБ при $BER = 10^{-5}$. Кривая ошибок ГНС практически совпадает с теоретическим пределом оптимального мягкого декодирования, что подтверждает способность сети аппроксимировать алгоритм максимального правдоподобия.

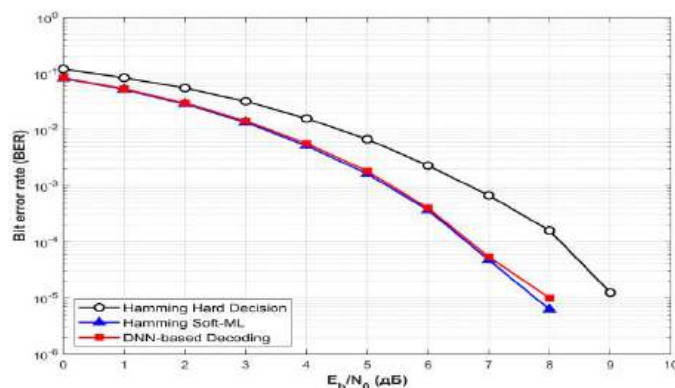


Рис. 2. Эффективность предложенного алгоритма декодирования

Заключение

В работе показана эффективность применения ГНС для канального декодирования. За счет глубоких нелинейных преобразований предложенная модель преодолевает ограничения традиционных математических подходов, обеспечивая заметное снижение BER. Результаты моделирования подтверждают превосходство нейросетевого декодера над классическими алгоритмами с жестким решением и указывают на перспективность применения методов искусственного интеллекта в системах беспроводной связи.

Список используемых источников

1. Massa. A., Marcantonio. D., Chen. X., Li. M., Salucci. M. DNNs as applied to electromagnetics, antennas, and propagation – A review // IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett. 2019. Vol. 18. PP. 2225–2229.
2. Lei. Y., He. M., Song. H., Teng. X., Hu. Z., Pan. P., Wang. H. A deep-neural-network-based decoding scheme in wireless communication systems // Electronics. 2023. Vol. 12(13), 2973.
3. Gruber. T., Cammerer. S., Hoydis. J., Ten Brink. S. On deep learning-based channel decoding. In 2017 51st annual conference on information sciences and systems (CISS) // IEEE. 2017. PP. 1-6.
4. Santra. S., Hsieh. J. W., Lin. C. F. Gradient descent effects on differential neural architecture search: A survey // IEEE Access, 9. 2021, 89602-89618.

EFFECTIVENESS OF DEEP NEURAL NETWORKS IN CHANNEL DECODING APPLICATIONS

Vu T., Glushankov E., Fam K.

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

The article proposes a channel decoding scheme based on deep neural networks, designed to overcome the computational limitations of traditional mathematical models. Through end-to-end machine learning and deep nonlinear transformations, the proposed model effectively adapts to noisy channels and recovers the original messages with high accuracy. Simulation results demonstrate that this neural network approach outperforms classical hard-decision decoding algorithms.

Key words: *decoding, machine learning, deep neural network*

УДК 004.42

ГРНТИ 20.15.13

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНО-АЛГОРИТМИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ШЛЮЗА ДЛЯ ОРКЕСТРАЦИИ МИКРОСЕРВИСОВ С ПОДДЕРЖКОЙ ПРОТОКОЛОВ gRPC И GraphQL

К. Н. Гах, М. Ю. Филатов, А. П. Шабанов

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В статье рассматриваются подходы к разработке программно-алгоритмического обеспечения API-шлюза для оркестрации микросервисной архитектуры с поддержкой протоколов gRPC и GraphQL. Особое внимание уделяется построению универсального шлюза на платформе .NET, обеспечивающего единый интерфейс доступа к распределенным сервисам. Анализируются методы интеграции GraphQL со службами, реализованными на gRPC, включая сопоставление схемы GraphQL с вызовами удаленных процедур. Рассматриваются алгоритмические решения, направленные на повышение эффективности обработки запросов, такие как агрегация множественных вызовов, кэширование данных и устранение проблемы N+1. Также исследуются механизмы аутентификации и передачи пользовательского контекста между компонентами системы.

микросервисы, API-шлюз, gRPC, GraphQL, оркестрация

Микросервисная архитектура предполагает разбиение системы на независимые сервисы, обособленно разрабатываемые и тестируемые. Такой подход удобен для распределенных систем, однако увеличение точек интеграции усложняет работу клиента с множеством различных контрактов. В связи с чем на практике необходимо выделять отдельный слой оркестрации, скрывающий внутреннюю архитектуру сервисов, снижающий связанность и формирующий единый интерфейс доступа [1].

Помимо выполнения роли маршрутизатора запросов, API-шлюз в микросервисной системе может агрегировать данные сервисов, преобразовывать протоколы, обеспечивать аутентификацию и контроль доступа. Сохранение производительности шлюза и предотвращение возникновения узкого места особенно важно для высоконагруженных систем. Для этих целей особенно интересны gRPC, дающий строгий контракт и компактную двоичную передачу данных, и GraphQL, предоставляющий гибкий клиентский запрос и точный выбор полей ответа [2-3].

Целью разработки является создание программно-алгоритмического обеспечения универсального шлюза на платформе .NET, способный принимать

GraphQL-запросы, сопоставлять с вызовами gRPC-сервисов и возвращать клиенту ответ. В .NET есть встроенная поддержка gRPC, возможности трансляции JSON-представления и механизмы работы с метаданными вызова [4].

С точки зрения архитектуры шлюз должен выступать композиционным слоем между набором внутренних микросервисов и клиентским интерфейсом. Его задача заключается в приеме внешних запросов, анализе схемы или контракта вызова, выделении требуемых операций и координировании их выполнения. При таком подходе клиенту предоставляется единая доменная модель, а не отдельные сервисы.

Строго типизированные контракты и описание сообщений через .proto-файлы важны для gRPC, использующего Protobuf как язык определения интерфейсов. В таком случае контракт сервиса задается заранее и однозначно интерпретируется в различных языках программирования, что упрощает синхронизацию модели данных между внешними сервисами и шлюзом [5].

GraphQL ориентирован на выбор полей объектов и обеспечивает клиенту возможность задавать запрос в соответствии с текущей задачей. Это дает возможность шлюзу выступать в роли посредника, принимающего графовый запрос, выделяющего сущности и строящего план обращения к gRPC-сервисам. В результате внутренняя реализация сохраняет преимущества gRPC, а клиент получает гибкость GraphQL. Программная часть шлюза может быть декомпозирована на прием запросов, разбор GraphQL-схемы, планирование gRPC-вызовов и сборку ответа. Поскольку платформа ASP.NET Core поддерживает размещение gRPC-служб и перенос метаданных между клиентами, с помощью нее удобно реализовать такое разделение. Схема взаимодействия клиента, GraphQL-шлюза и набора gRPC-сервисов представлена на рисунке 1.

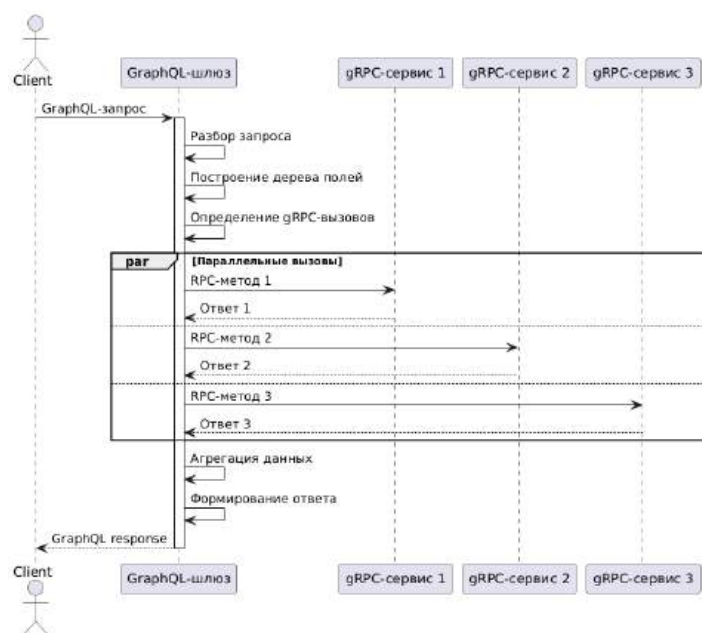


Рис. 1. Схема взаимодействия клиента, GraphQL-шлюза и набора gRPC-сервисов

Сопоставление запросов GraphQL с удаленными процедурами gRPC является наиболее сложной частью. Внешний GraphQL-тип должен связываться в внутренним методом gRPC, а поля запроса должны соотноситься с параметрами вызова и структурой ответа. Для каждого распознавателя задаются правила преобразования, после чего шлюз, в соответствии с зависимостями между полями, собирает gRPC-вызовы.

В современных версиях ASP.NET Core предусмотрена технология gRPC JSON transcoding, создающая RESTful API поверх gRPC-служб, что для шлюза является удобным промежуточным механизмом, позволяющим обслуживать одним и тем же контрактом как REST-клиентов, так и слой оркестрации. Такой подход позволяет постепенно внедрять архитектуру без резкой замены точек интеграции [6]. Алгоритм сопоставления GraphQL-схемы с вызовами gRPC и последующей агрегацией ответа представлен на рисунке 2.



Рис. 2. Алгоритм сопоставления GraphQL-схемы с вызовами gRPC и последующей агрегацией ответа

Ключевой проблемой GraphQL является эффект N+1, представляющий собой порождение одним корневым запросом серии последовательных обращений к источникам данных. В построенном поверх gRPC шлюзе этот эффект проявляется как цепочка удаленных вызовов к одному и тому же сервису. Пакетирование запросов, предварительная загрузка связанных сущностей и кэширование промежуточных результатов применяются для устранения этой проблемы [7, 8].

Построить граф зависимостей между полями ответа будет полезным на уровне алгоритма. После определения корневого набора сущностей для каждой вершины графа вычисляется множество дочерних полей. При запросе одинаковых данных от нескольких распознавателей шлюз выполняет один gRPC-вызов и распределяет результат по всем потребителям, что снижает время ответа и нагрузку на сеть.

Целесообразно применять кэш с ограниченным временем жизни для повторяющихся сценариев, где GraphQL-запросы повторяются с небольшими вариациями полей. При этом важно учесть инвалидацию, при которой данные должны очищаться при изменении доменной модели в целях избегания выдачи устаревшей информации.

Шлюз, помимо выдачи ответов, должен сохранять контекст безопасности от входящего запроса до внутренних сервисов. Для передачи токена и других метаданных в gRPC используется коллекция Metadata, отправляемая как HTTP-заголовки. Проверка и передача пользовательского контекста без необходимости повторной аутентификации на каждом уровне позволят сделать возможным сквозную аутентификацию.

Предложенный подход позволяет объединить две парадигмы взаимодействия с микросервисами. gRPC дает компактный, типизированный и производительный способ взаимодействия между внутренними компонентами, а GraphQL обеспечивает гибкий клиентский контракт и уменьшает избыточность данных. Универсальный шлюз становится слоем оркестрации, способным скрывать сложность распределенной системы и постепенно интегрировать сервисы в общий контур.

Разработка программно-алгоритмического обеспечения шлюза для оркестрации микросервисов требует решения задач маршрутизации, оптимизации обращений и безопасности. Использование .NET, gRPC и GraphQL позволяет построить гибкий слой интеграции, который сочетает производительность внутреннего взаимодействия и удобство внешнего API. Контрактное описание сервисов, графовый планировщик вызовов, механизмы

агрегации, кэширования и сквозной передачи контекста становятся наиболее важными элементами такого шлюза. При дальнейшей реализации перспективно развивать автоматическую генерацию распознавателей из схемы и более тонкую оптимизацию сбора данных.

Список используемых источников

1. Cesar de la Torre, Rousos M. и др. Микрослужбы .NET. Архитектура контейнерных приложений .NET // learn.microsoft.com. 2025. URL: <https://learn.microsoft.com/ru-ru/dotnet/architecture/microservices/> (дата обращения: 06.04.2026).
2. Ньютон-Кинг Дж. Общие сведения о gRPC на .NET // learn.microsoft.com. URL: <https://learn.microsoft.com/ru-ru/aspnet/core/grpc/> (дата обращения: 06.04.2026).
3. Общие сведения о GraphQL. URL: <https://docs.github.com/ru/graphql/guides/introduction-to-graphql> (дата обращения: 06.04.2026).
4. Ньютон-Кинг Дж. Проверка подлинности и авторизация в gRPC для ASP.NET Core // learn.microsoft.com. URL: <https://learn.microsoft.com/ru-ru/aspnet/core/grpc/authn-and-authz> (дата обращения: 06.04.2026).
5. Ньютон-Кинг Дж. Создание сообщений protobuf для приложений .NET // learn.microsoft.com. URL: <https://learn.microsoft.com/ru-ru/aspnet/core/grpc/protobuf> (дата обращения: 06.04.2026).
6. Новые возможности ASP.NET Core в .NET 7 // learn.microsoft.com. URL: <https://learn.microsoft.com/ru-ru/aspnet/core/release-notes/aspnetcore-7.0> (дата обращения: 06.04.2026).
7. Moutard R. GraphQL: от восторга до разочарования // Habr.com. 2023. URL: <https://habr.com/ru/articles/728476/> (дата обращения: 06.04.2026).
8. Курапов А. Путь к Федеративному GraphQL // Habr.com. 2020. URL: <https://habr.com/ru/articles/518554/> (дата обращения: 06.04.2026).

Статья представлена научным руководителем, и. о. заведующим кафедрой САР СПбГУТ, кандидатом технических наук, доцентом В. С. Уссом.

DEVELOPMENT OF SOFTWARE AND ALGORITHMIC GATEWAY FOR THE ORCHESTRATION OF MICROSERVICES WITH SUPPORT FOR GRPC AND GRAPHQL PROTOCOLS

Gakh K., Filatov M., Shabanov A.

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

The article discusses approaches to the development of software and algorithmic support for an API gateway for the orchestration of microservice architecture with support for gRPC and GraphQL protocols. Special attention is paid to building a universal gateway on the platform.NET, which provides a single interface for accessing distributed services. The methods of GraphQL integration with gRPC-based services are analyzed, including mapping GraphQL schema to remote procedure calls. Algorithmic solutions aimed at improving query processing efficiency are considered, such as multiple call aggregation, data caching, and troubleshooting the N+1 problem. Authentication mechanisms and user context transfer between system components are also being investigated.

Key words: microservices, API gateway, gRPC, GraphQL, orchestration

УДК 621.391.812

ГРНТИ 49.43.29

ОЦЕНКА И МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАДИОЛИНИЙ

И. А. Горобцов

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В статье оценивается энергетическая эффективность радиолиний по критерию отношения мощности сигнала к суммарной мощности помех и шума. В соответствие с неравенством Рао-Крамера дисперсия ошибки успешного приема сигнала не менее величины, обратно пропорциональной отношению сигнал/шум, определяет его эффективную оценку. Представлены зависимости дисперсии ошибки от отношения сигнал/шум для различных видов модуляции. Также представлены методы повышения энергетической эффективности, приведено сравнение применяемых методов по отношению к релеевскому каналу с аддитивным белым гауссовским шумом.

энергетическая эффективность, отношение сигнал-шум, граница Рао-Крамера, аддитивный белый гауссовский шум

Многолучевость, наличие замираний, переотражения, взаимное влияние антенных элементов друг на друга, шумы и помехи в канале в совокупности создают сложную помеховую обстановку. В связи с этим вопрос о повышении энергетической эффективности радиолиний является актуальным. В качестве критерия энергетической эффективности в статье будут рассматриваться показатели отношение сигнал-шум и вероятность ошибочного приема [1].

Для оценки энергетической эффективности удобно воспользоваться границей Рао-Крамера. Дисперсия ошибки оценивания эффективности системы может быть описана неравенством Рао-Крамера в виде [2]:

$$D_{\tau} \geq - \left(M \left\{ \frac{\partial^2 F(\tau)}{\partial \tau^2} \right\} \right)^{-1} = - \left(\frac{\partial^2 M[F(\tau)]}{\partial \tau^2} \right)^{-1}, \quad (1)$$

где D_{τ} – дисперсия ошибки, $F(\tau)$ – функция правдоподобия.

При представлении функции правдоподобия в корреляционном приближении получим:

$$M[F(\tau)] = M \left[\frac{2}{N_0} \int_0^T y(t)s(t, \tau) dt \right] + c = 2qR_h(\tau) + c, \quad (2)$$

где $y(t)$ – передаваемый сигнал, $s(t, \tau)$ – принятый сигнал, τ – задержка сигнала, N_0 – спектральная плотность шума, q – отношение сигнал/шум, $R_h(\tau)$ – корреляционная функция огибающей сигнала:

$$R_h(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T h(t, \tau) h(t, \tau') dt,$$

где $h(t, \tau)$ – матрица энергетических параметров сигнала.

Подставляя (2) в (1), получим:

$$D_\tau \geq -\frac{1}{2q} \left(\frac{\partial^2 R_h(\tau)}{\partial \tau^2} \right)^{-1}. \quad (3)$$

Равенство в (3) достигается только для эффективной оценки, для которой плотность распределения вероятностей является гауссовской. В соответствии с правой частью данного неравенства видно, что ошибка обратно пропорциональна ОСШ на входе устройства оценивания, а значит повышение энергетической эффективности системы, а, соответственно, и вероятности успешной передачи сигнала состоит в увеличении отношения сигнал-шум.

На рисунке 1 показана зависимость дисперсии ошибки от отношения сигнал/шум при оценке сигнала с различными видами модуляций с помощью границы Рао-Крамера. Как видно из рис. 1, при увеличении ОСШ результаты моделирования приближаются к теоретической границе Рао-Крамера, что говорит об эффективности представленной методики.

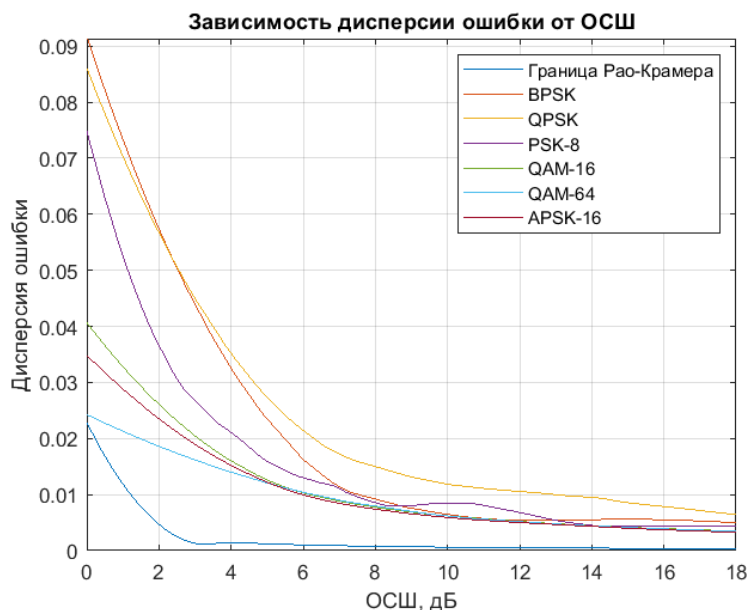


Рис. 1. Зависимость дисперсии ошибки сигнала от ОСШ

Как видно из рис. 1, увеличение значения ОСШ уменьшает дисперсию ошибки сигнала на выходе демодулятора по отношению к исходному сигналу, приближая первый к границе Рао-Крамера.

Одним из методов повышения энергетической эффективности радиолиний является применение методов пространственно-временной обработки сигналов. Одним из простейших таких алгоритмов является алгоритм LMS с минимальной квадратичной погрешностью целевой функции [3]:

$$F(W(k)) = e^2(k) = (d(k) - W^H(k)x(k))^2 \rightarrow \min_W,$$

где $d(k)$ – вектор передаваемого сигнала длиной L , $W(k)$ – весовая матрица размерностью $L \times N$, ^{H} – символ эрмитова сопряжения, $x(k)$ – вектор принятого сигнала длиной N , L и N – число приемных и передающих антенн соответственно, k – номер антенного элемента.

С учетом нестационарности сигнала, матрица весовых коэффициентов будет определяться как:

$$W(k) = W(k-1) + \mu(k)e^H(k)x(k),$$

где $\mu(k)$ – шаг адаптации:

$$\mu(k) = \frac{\mu(0)}{x^H(k)x(k) + \varepsilon},$$

где $\mu(0)$ – фиксированное значение шага, влияющее на сходимость алгоритма, ε – параметр, определяющий максимальное значение шага при нулевом принятом сигнале.

Отношение сигнал-шум в таком случае определяется с помощью [4]:

$$SNR = \frac{W^H R_d W}{W^H R_{sh} W},$$

где R_d – корреляционная матрица принятых сигналов, R_{sh} – корреляционная матрица шумов.

Вероятность ошибки определим через функцию ошибок [5]:

$$BER = \frac{C}{\log_2 M} \frac{1}{2} \Phi \left(\sqrt{\frac{\beta}{2} SNR} \right),$$

где C и β – коэффициенты, зависящий от типа модуляции сигнала, M – размер созвездия, $\Phi(\cdot)$ – функция Крампа.

На рис. 2-4 представлены графики зависимости вероятности ошибки от ОСШ для рэлеевского канала с АБГШ и при применении алгоритма LMS для разных типов модуляции сигнала.

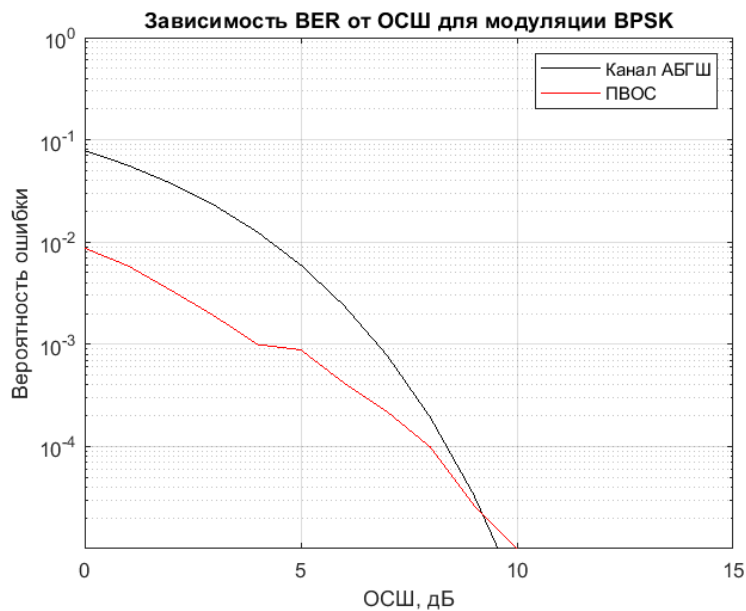


Рис. 2. Зависимость вероятности ошибки от ОСШ для модуляции BPSK

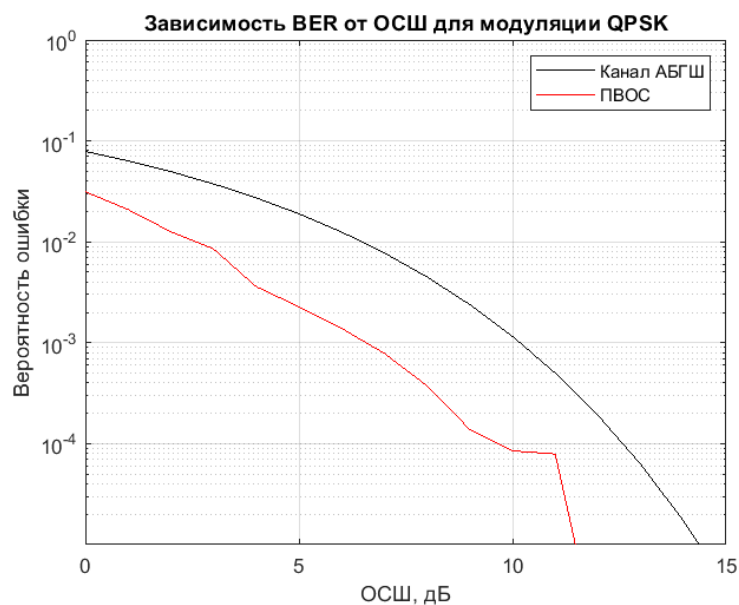


Рис. 3. Зависимость вероятности ошибки от ОСШ для модуляции QPSK

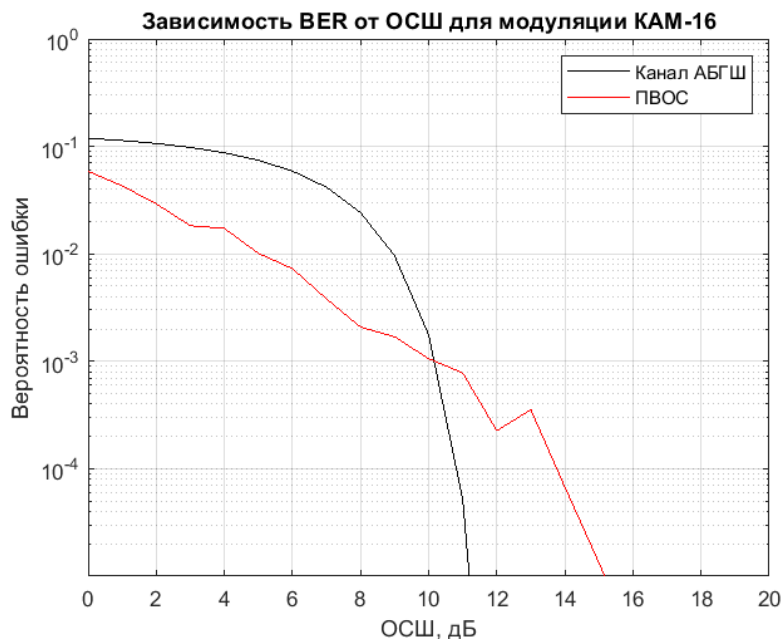


Рис. 4. Зависимость вероятности ошибки от ОСШ для модуляции КАМ-16

Как видно из рис. 2-4, при сложной помеховой обстановке применение алгоритмов пространственно-временной обработки сигналов позволяет улучшить вероятность ошибки при низких значениях ОСШ, в связи с чем их применение позволяет повысить энергетическую эффективность радиолиний.

Список используемых источников

1. Владыко А. Г., Глушанков Е. И., Горобцов И. А. Оценка энергетической эффективности гибридных сетей связи // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании. XIV Международная научно-техническая и научно-методическая конференция: сб. науч. ст. в 2-х т. СПб.: СПбГУТ, 2025. Т. 2. С. 303-307.
2. Тихонов В. И., Харисов В. Н. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем: учебное пособие для вузов. М.: Радио и связь, 1991. 608 с.
3. Boyko I., Gorobtsov I., Glushankov E., Vladiko A. Methods of Adaptive Signal Processing in Hybrid Network Communication, 2025 IEEE XVII International Scientific and Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE), Novosibirsk, Russian Federation, 2025. PP. 1-5, DOI: 10.1109/APEIE66761.2025.11289216.
4. Ермолаев В. Т., Флакسمан А. Г., Сорокин И. С. Регуляризованная оценка весового вектора адаптивной антенной решетки // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. 2012. Т. 55. N 9. С. 641-650.
5. Васин В. А., Калмыков В. В., Себекин Ю. Н., Сенин А. И., Фёдоров И. Б. Радиосистемы передачи информации: учебное пособие для вузов. М.: Горячая линия – Телеком, 2005. 472 с.

Статья представлена научным руководителем, профессором кафедры РТ СПбГУТ, доктором технических наук, профессором Е. И. Глушанковым.

EVALUATION AND METHODS FOR IMPROVING THE ENERGY EFFICIENCY OF RADIOLINES

Gorobtsov I.

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

The article evaluates the energy efficiency of radio lines by the criterion of the ratio of signal power to the total power of interference and noise. In accordance with the Rao-Kramer inequality, the variance of the error of successful signal reception is at least inversely proportional to the signal-to-noise ratio, which determines its effective estimation. The dependences of the error variance on the signal-to-noise ratio for various types of modulation are presented. Methods for increasing energy efficiency are also presented, and a comparison of the methods used in relation to a Rayleigh channel with additive white Gaussian noise is presented.

Key words: *energy efficiency, signal-to-noise ratio, Rao-Kramer boundary, additive white Gaussian noise*

УДК 621.373

ГРНТИ 47.41.35

РАЗРАБОТКА ЦИФРОВОГО ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО СИНТЕЗАТОРА С АЛГОРИТМОМ РАСЧЕТА НАЧАЛЬНОЙ ФАЗЫ СИГНАЛОВ

В. В. Давыдов^{1,2}, И. В. Сочнев³¹Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого³ООО «ДЖИ ВИ ТЕК»

Существует множество методов разработки быстропереключаемых синтезаторов частот, один из которых – это применение цифрового вычислительного синтезатора (ЦВС). Но из-за особенностей работы фазового аккумулятора ЦВС их применение в когерентных системах ограничено: при переключении частоты накопленная фаза не компенсируется. Поэтому при переключении на прежнюю частоту начальная фаза теряется. Для сохранения начальной фазы сигналов схема управления должна иметь в своем составе устройство фазовой памяти, которое будет рассчитывать фазу для каждого сигнала. Вместе с данными о новой частоте сигнала будут записываться и данные о фазовой отстройке данного сигнала. Таким образом, все сигналы с одинаковой частотой будут иметь одинаковую начальную фазу. Алгоритм работы устройства фазовой памяти предполагает расчет начальной фазы без сброса фазового аккумулятора ЦВС, что уменьшает время перестройки частоты.

цифровой вычислительный синтезатор, устройство фазовой памяти, начальная фаза

Введение

В измерительных приборах таких, как генераторы, анализаторы спектра и векторные анализаторах цепей, используют синтезаторы когерентных частот (СКЧ) [1], задача которых заключается в синтезировании и перестраивании частот в определенном диапазоне, с высокой точностью, высоким быстродействием с возможностью сохранения когерентности сигналов [1-4]. Также когерентные сигналы необходимы для имитации различных воздействующих, особенно СВЧ сигналов, и формирования заданного волнового фронта.

В данный момент разработанные синтезаторы и формирователи сигналов используют метод с фазовой автоподстройкой частоты (ФАПЧ), которые синхронизируются общим опорным источником. Эти устройства имеют

отдельные внутренние генераторы, управляемые напряжением (ГУН) [5, 6]. Однако, паразитная модуляция, вызванная работой сигма-дельта модулятора при дробно-численном режиме работы делителя частоты ГУН [5, 6], приводит к появлению фазовых ошибок. Более того, просачивание сигналов неактивных синтезаторов с ФАПЧ приводит к появлению нежелательных гармоник на выходе формирователей и синтезаторов.

Данную проблему решают с помощью цифровых вычислительных синтезаторов (ЦВС) [7-9]. Скорость перестройки частоты в них в основном определяется импульсным откликом сглаживающих фильтров [8-12]. Поскольку, требуется только один синтезатор ЦВС для синтеза когерентных сигналов, то отсутствуют побочные воздействия, вызванные работой соседних синтезаторов. В этом случае, для разработки высокочастотного синтезатора с применением ЦВС необходимо лишь сформировать тактовую частоту.

Однако существует особенность перестройки частоты сигнала, синтезируемого ЦВС, с одной частоты на другую приводящая к потере начальной фазы сигналов с одинаковой частотой [13]. Но использование возможностей ЦВС позволяет синтезировать когерентные сигналы на одинаковых частотах с помощью алгоритмов расчета начальной фазы.

Разработка когерентного синтезатора частот с использованием ЦВС

Формирование частот с помощью ЦВС ограничено частотой Найквиста. Поэтому нами в разработанной конструкции цифрового синтезатора предлагается использовать метод синтеза необходимого набора частот с помощью умножителей частоты и фильтров, коммутируемых между собой ключами. Структурная схема новой конструкции цифрового когерентного синтезатора (ЦКС) с реализованным в ПЛИС алгоритмом расчета фазовой отстройки представлена на рис. 1, в которой используется ЦВС.

В предлагаемой конструкции синтезатора ЦВС (рис. 1) когерентные сигналы формируются в диапазоне частот от 100 МГц до 32 ГГц. Для разработанной ЦКС был выбран ЦВС AD9914, формирующий сигналы с частотой от 100 МГц до 1500 МГц [14] с возможностью перестройки не более 5 нс. После умножения частоты на его (ЦКС) выходе формируются сигналы с частотами от 100 МГц до 32 ГГц. Когерентность каждого сигнала обеспечивается алгоритмом расчета начальной фазы, представленным ниже.

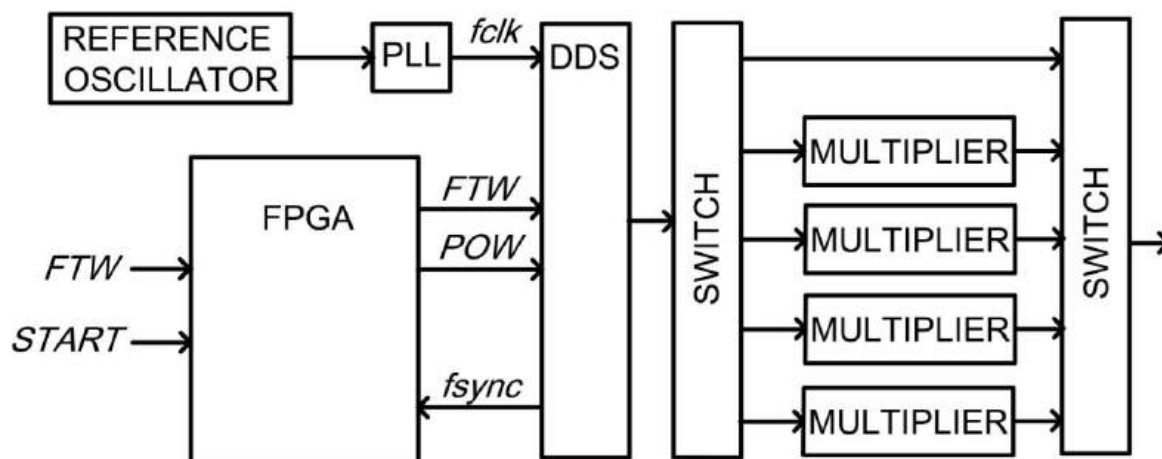


Рис. 1. Структурная схема синтезатора

Для формирования когерентных частот необходимо компенсировать накопленную фазу в фазовом аккумуляторе ЦВС с помощью фазовой поправки:

$$\sigma = \phi_n^p - \sum_{i=0}^n \psi_i, \quad (1)$$

где ψ_i – значение фазы, накопленное в фазовом аккумуляторе ЦВС i -той частотой за время работы, ϕ_n^p – текущая фаза в n -ый момент времени p -той частоты, σ – искомое значение фазовой отстройки ЦВС.

В разработанной конструкции ЦКС значение фазового инкремента можно вычислить, используя счетчики и значения инкрементов (2).

$$POW_i = \text{mod} \left(\frac{f_{clk}}{f_{sync}} \cdot FTW_i, 2^n \right), \quad (2)$$

где f_{clk} – тактовая частота ЦВС, f_{sync} – системная частота ЦВС, POW_i – значение фазового инкремента, FTW_i – значение регистра частоты, n – разрядность регистров, mod – остаток от деления.

В отличие от модели, представленной в [15, 16], предлагаемая модель синтезатора работает без обнуления фазового аккумулятора ЦВС из-за наличия дополнительных задержек. Но для формирования когерентных сигналов нужно сохранять в памяти два значения текущих фаз для расчета фазового дискриминанта (3).

$$\Delta POW_j = \text{mod} \left(k \cdot POW_i - \sum_{m=0}^{i-1} \sum_{j=0}^{p_m} POW_j, 2^n \right), \quad (3)$$

где ΔPOW_j – значение фазового дискриминанта к моменту переключения частот, POW_i – значение фазового инкремента следующей частоты, POW_{i-1}

– значение фазового инкремента предыдущей частоты, n – разрядность регистров, i – номер частоты, k – номер такта.

Полученное значение фазового дискриминанта записывается вместе с частотой непосредственно в ЦВС. На рисунке 2 показан принцип работы устройства: фаза $\Sigma(t)$ показывает зависимость текущей фазы переключаемого сигнала, синтезируемого ЦВС, фаза $\Delta(t)$ показывает зависимость разности фаз между сигналами разных частот и зависимости текущих фаз (фаза1(t) и фаза2(t)) эталонных сигналов.

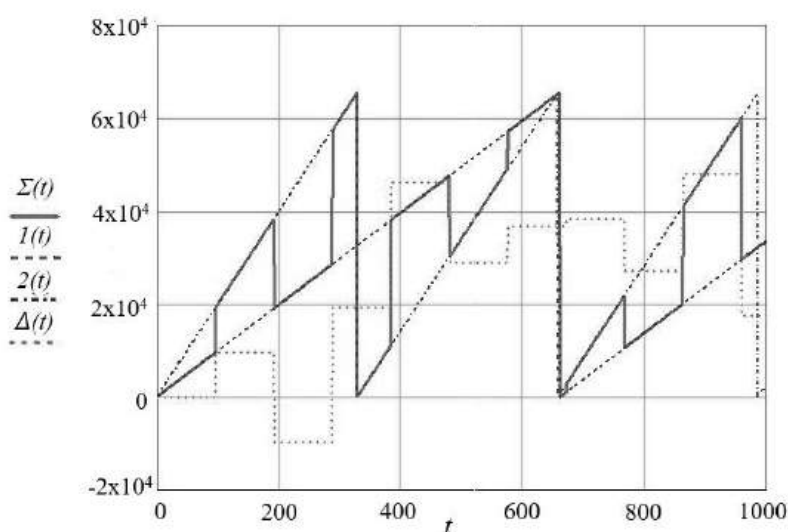


Рис. 2. Зависимости текущих фаз сигналов от номера такта

В результате из полученных формул можно выделить цифровые устройства такие как: счетчики с коэффициентом счета, память для хранения констант, умножители и сумматоры.

На рисунке 3 представлена структурная схема устройства, реализующей алгоритм (формула (3)). В устройстве значение частоты FTW перемножается с коэффициентом отношения частот ЦВС к системной частоте, получая при этом фазовый инкремент, и со значением на счетчике с коэффициентом счета для расчета текущей фазы. Далее получаем фазовую отстройку, вычитая из текущей фазы значение текущей фазы предыдущей частоты. Фазовый инкремент подается на регистр, который будет хранить значение до следующего цикла записи, определяемого сигналом START. Данное значение необходимо для расчета текущей фазы POW, накопленного в ЦВС, и будет суммироваться на сумматоре каждый такт системы.

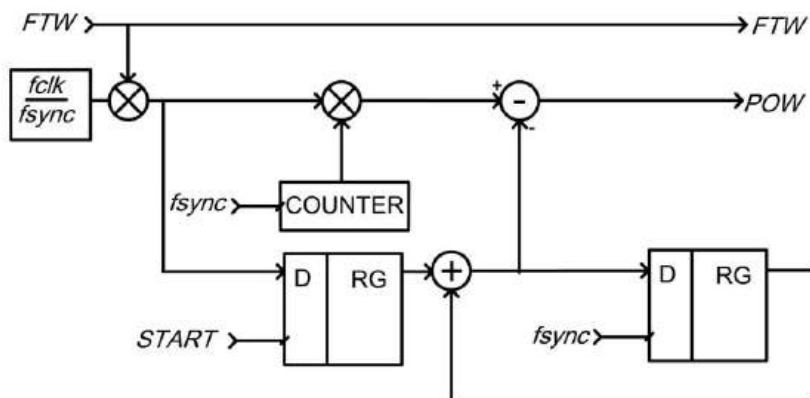


Рис. 3. Структурная схема расчета начальной фазы

Полученные результаты синтеза проекта показывают, что потребуется порядка 360 логических элементов и 10 умножителей. Отсюда следует, что количество использованных ресурсов незначительно, по сравнению с ресурсами современных ПЛИС.

Экспериментальные результаты

Результат работы синтезатора с устройством фазовой памяти показана на рисунке 4. На рисунке 4 приведена зависимость текущей фазы переключаемого с частоты на частоту сигнала от времени. Видно, что при переключении сигнала на другую частоту и переключении на прежнюю частоту ЦВС моментально применяет значение фазовой отстройки для каждого сигнала с сохранением начальной фазы сигналов с одинаковыми частотами.

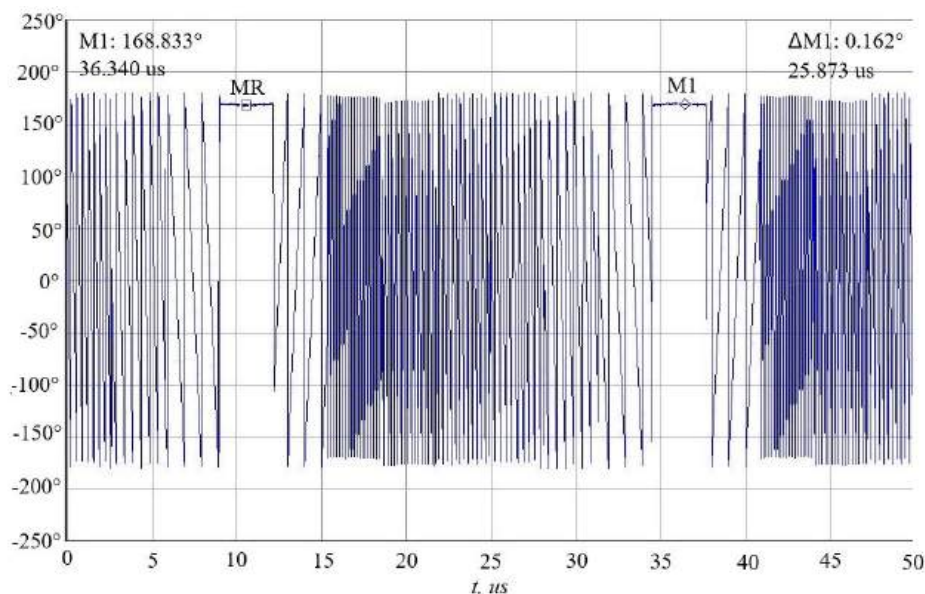


Рис. 4. Экспериментальные результаты значений текущих фаз

На рисунке 4 представлены результаты измерений, проведенные с помощью тестовой платы EVAL-AD9914, сигнал которой подается на анализатор реального времени. В анализаторе с помощью режима измерения фазы от времени, где сигнал перемножается с сигналом встроенного эталонного генератора, формируется зависимость начальной фазы от времени (рис. 8). При данном режиме измерения ЦВС переключается между частотами каждые 3 мкс. При этом эталонный генератор был настроен на одну из частот. По результатам измерений с учетом погрешности измерительного прибора получаем $[0,162 \pm 0,5]$ градуса.

Заключение

Анализ полученных результатов показывает, что разработанный ЦКС обладает рядом преимуществ по сравнению с существующими синтезаторами. В приведенной ЦКС дополнительно обеспечивается быстроедействие за счет формата записи в регистры ЦВС за счет оптимального вычисления фазового дискриминанта.

При сравнении ЦКС с коммутируемыми синтезаторами с ФАПЧ, отсутствуют коммутаторы и дополнительные синтезаторы с ФАПЧ, что ведет к отсутствию в спектре частот сигналов от дополнительных синтезаторов с ФАПЧ. При этом число когерентных сигналов не зависит как от количества синтезаторов с ФАПЧ, так и от их режимов работы. Также необходимо для разного диапазона синтеза частот определять оптимальное число используемых ФАПЧ, с учетом перечисленных выше факторов. Все эти сложности исключены в разработанном ЦКС.

Это делает применение ЦКС более перспективным, чем используемые в настоящее время синтезаторы когерентных СВЧ сигналов в различных системах в имитации и измерениях [1, 8, 17, 18].

Список используемых источников

1. Криков Д. С. Синтезаторы сетки частот в радиоэлектронных системах // Труды МАИ, Изд-во МАИ, Москва, 2018. выпуск № 98.
2. Wen Z., Yun E., Sun S., Li W., Hao Q. A Power Stabilized Low Noise Frequency Synthesizer for CPT Atomic Clocks // Acta Metrologica Sinica, 2025. Vol. 46(2). PP. 267–273. URL: <http://dx.doi.org/10.3969/j.issn.1000-1158.2025.02.15>.
3. Ju C., Liu N., Luo Q., Fan J., Yan D. Real-Time Demonstration of a Digital Interpolator-Free Clock Recovery for an FPGA-Based PM-QPSK Coherent Optical Receiver // Journal of Lightwave Technology, 2025. Vol. 43(1). PP. 155–161. URL: <http://dx.doi.org/10.1109/JLT.2024.3449805>.

4. Pomponio M., Hati A., Nelson C. Ultra-Low Phase Noise Frequency Division with Array of Direct Digital Synthesizers // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2024. Vol. 73(5501310). PP. 1–10 (2024). URL: <http://dx.doi.org/10.1109/TIM.2023.3346538>.
5. Louassaa K., Guerrero J. M., Boukerdja M., Cherifi A., Yousaf M. Z. A novel hierarchical control strategy for enhancing stability of a DC microgrid feeding a constant power load // *Scientific Reports*, 2025. Vol. 15(1), P. 7061. <http://dx.doi.org/10.1038/s41598-025-89318-0>.
6. Chen J., Wang S., Li Q., Gu Q.J., Xu Z. A V-Band FMCW Signal Generator With Hybrid Dual-Path VCO Technique Achieving 13.6-GHz Chirp Bandwidth // *IEEE Transactions on Circuits and Systems II Express Briefs*, 2025. Vol. 72(5). PP. 658–662. URL: <http://dx.doi.org/10.1109/TCSII.2025.3547342>.
7. Surzhik D. I., Kuzichkin O. R., Vasilyev G. S. Modeling of the Payload Signal Generator of the UAV Radio Transmitter based on the Phase Distortion Autocompensator // *International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication*, 2022. Vol. 10(1). PP. 15–18. URL: <http://dx.doi.org/10.17762/ijritcc.v10i1s.5791>.
8. Zhao B., Zhang Y., Lang S., Fang G., Cui X. Shallow-Layers-Detection Ice Sounding Radar for Mapping of Polar Ice Sheets // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60, 234–243 (2022). <http://dx.doi.org/10.1109/TGRS.2021.3074186>.
9. Петров А. А., Давыдов В. В., Гребенникова Н. М. О возможности применения метода прямого цифрового синтеза при разработке синтезаторов частоты для квантовых стандартов частоты. *Радиотехника и электроника*, 2018. № 63(11). С. 1159–1164.
10. Ryabov I. V. Digital signal processing engine design for polar transmitter in wireless communication systems // *Instruments and Experimental Techniques*, 2006. Vol. 49(3). PP. 376–378.
11. Pestryakov A. V., Smirnov A. E. Stereo actuator on the basis of digital computing synthesizers. *Elektrosvyaz*, 2001, N 6. PP. 34–36.
12. Kuleshov V. N., Lyu Kh., Kuznetsova G. V. Intrinsic noise of multilevel digital computing frequency synthesizers. *Telecommunications and Radio Engineering*, 1995. Vol. 49(8). PP. 99–102.
13. Erickson K. Coherent multi-channel RF synthesis // *Holzworth Instrumentation*, Boulder, Colorado, USA, 2010. P. 3. URL: http://www.holzworth.com/Aux_docs/Holz_Coherent_Synth_Mar2010.pdf (accessed 02.08.2018).
14. AD9914 Datasheet. *Analog Devices*, 2012. С. 17–27. URL: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD9914.pdf> (accessed 02.08.2018).
15. Patent № US 2014/0240004A1, H03B 21/00. Fawley R. J., Masoum H., Scarbro A., Williams A. D. Phase disciplined, direct digital synthesizer based, coherent signal generator. Application publication. 2014.
16. Сочнев И. В. Моделирование переключаемого синтезатора частот с устройством фазовой памяти // *Радиопромышленность*. 2017. № 1. С. 50–56.
17. Kudinov S. I., Ivanov V. E., Bukrin, I. V. Powerful Microwave Pulse Radio Transmitter of Coherent Aerological Radar // *Proceedings 2025 IEEE Ural Siberian Conference on Biomedical Engineering Radioelectronics and Information Technology Usbereit*, 2025. PP. 183–186. URL: <http://dx.doi.org/10.1109/USBREIT65494.2025.11054086>.
18. Чан Х. Н., Подстригаев А. С., Нгуен Ч. Н. Алгоритм классификации сигналов с детектированием на двух промежуточных частотах для средств радиотехнического мониторинга // *Успехи современной радиоэлектроники*, 2022. № 76(7). С. 30–39.

DIGITAL FREQUENCY SYNTHESIZER OF PHASE COHERENT SIGNALS

Davidov V.^{1,2}, Sochnev I.³

¹ The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

² Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University

³ GV Tech LLC

Direct digital synthesizers (DDS) allow us to design fast switching synthesizers for coherent system applications. However using this one in coherent systems is restricted to lack of ability of synthesizing phase coherent signals, herein switching signals with different frequencies to each other is commit to loss of initial phase of next signal due to accumulation of current one in a DDS accumulator. To avoid that feature of DDS signal switching it needs to use an ability of signal parameter managing. For switching in phase coherent manner digital device scheme must contain phase memory algorithm to calculate each signal initial phase. There it will be writing both a frequency tuning word and a phase offset word into the DDS accumulator. The phase memory processing supposes the initial phase computation without the DDS accumulator reset that reduces the frequency hopping time.

Key words: *direct digital synthesis, phase memory device, initial phase*

УДК 004.421

ГРНТИ 50.43.15

МЕТОДИКА ВЫЧИСЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТРАЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ МОРСКИМ АВТОНОМНЫМ НАДВОДНЫМ СУДНОМ

Г. В. Данилин¹, А. А. Денисова², С. С. Соколов³, Ю. К. Худайназаров³

¹ООО «Газинформсервис»,

²ООО «Датаджайл»,

³Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова

Работа посвящена описанию методики траекторного управления морским автономным надводным судном. В работе приводится описание взаимодействия, устанавливаемого между алгоритмом и математической моделью движения судна, лежащего в основе методики вычисления параметров траекторного управления морским автономным надводным судном.

национальная технологическая инициатива, траекторное управление, автономное судно, безэкипажное судовождение

При управлении большими системами активно используется метод согласования иерархических решений. Он предполагает деление сложной системы на множество подсистем с последующим согласованием полученных подзадач. Для создания программы управления безэкипажным судном необходимо решить вопрос математического и алгоритмического обеспечения.

Фундаментом данной работы служат предыдущие исследования, представленные в работах [1-4].

В рамках работы на первом этапе устанавливается взаимосвязь между параметрами, вычисляемыми алгоритмом обхода препятствий [1, 2], и параметрами, рассчитываемыми с их участием математической моделью, описывающей движение судна [3, 4]. В результате, выявляется параметр, оказывающий ключевое значение на возможность управления судном с учетом наложенных на алгоритм ограничений. Определяются зависимые от него параметры, вычисляемые попутно.

Схема, отражающая связь между параметрами, вычисляемыми алгоритмом, и параметрами, рассчитываемыми с их участием моделью, изображена на рис. 1.



Рис. 1. Связь алгоритма обхода препятствий с математической моделью движения судна

Из рис. 1 следует, что на вход алгоритма поступают координаты точки начала движения и точки назначения, технические характеристики судна (используются ограниченно, т.к. из них для алгоритма важны лишь габаритные размеры). Помимо этого, в алгоритм передаются линейная скорость, дистанция учета потенциалов (дистанция до препятствия или встречного судна, по достижении которой управляемое судно начинает корректировку курса), начальное значение курса судна, угол коррекции, на который судно будет должно изменить курс в случае опасности лобового столкновения, обнуляется счетчик времени и назначается шаг времени. На основании этих данных алгоритм осуществляет вычисление и передачу в модель значений координат очередной точки маршрута и вектора скорости в ней.

В модель также поступают технические характеристики судна (в полном объеме), значения курса в начальный момент времени, линейная скорость, рассчитанные алгоритмом значения проекций вектора скорости в каждой точке и шаг времени.

Модель на первом этапе вычисляет курс судна в очередной точке, а затем значение угла перекладки руля, который необходимо обеспечить рулевой системе судна, находясь в предыдущий момент времени на предыдущей точке, чтобы попасть в текущую. Вычислив угол перекладки руля, модель использует его для вычисления значений угла дрейфа и угловой скорости судна.

На втором этапе работы проводится реструктуризация последовательности вычислений, осуществляемых в рамках модели, с целью экспериментального определения численных значений ключевого параметра.

Полученные данные, с поправкой на скорость реакции исполнительных механизмов могут быть использованы блоком управления судна для формирования управляющих команд.

Список используемых источников

1. Данилин Г. В., Соколов С. С. Построение модели обхода судном препятствия на основе метода потенциальных полей // Региональная информатика (РИ-2024). XIX Санкт-Петербургская международная конференция «Региональная информатика (РИ-2024)»: Материалы конференции, Санкт-Петербург, 23-25 октября 2024 г. СПб.: СПОИСУ, 2024. С. 218-219.

2. Данилин Г. В., Денисова А. А., Соколов С. С., Худайназаров Ю. К. Алгоритм расхождения встречнодвижущихся судов, основанный на методе потенциальных полей // Экстремальная робототехника. 2025. № 1 (36). С. 68-72.

3. Данилин Г. В., Соколов С. С. Исследование математических моделей движения судна и технологий безэкипажного судовождения // Сборник научных статей национальной научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова», Санкт-Петербург, 19 – 21 сентября 2022 года. СПб.: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова, 2022. Т. 1. С. 72–78.

4. Данилин Г. В., Соколов С. С. Расчет параметров движения безэкипажного судна в программной среде Maple 12 // Региональная информатика и информационная безопасность: Сборник трудов Санкт-Петербургской международной конференции, Санкт-Петербург, 25–27 октября 2023 года. СПб. Санкт-Петербургское Общество информатики, вычислительной техники, систем связи и управления, 2023. С. 214–216.

PROCEDURE FOR CALCULATING PARAMETERS OF TRAJECTORY CONTROL OF A MARITIME AUTONOMOUS SURFACE SHIPS

Danilin G.¹, Denisova A.², Sokolov S.³, Khudainazarov Y.³

¹ Gazinformservice LLC,

² DataAgile LLC,

³ Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping

The work is devoted to the description of the method of trajectory control of a maritime autonomous surface ships. description is given of interaction established between algorithm and mathematical model of vessel motion, which is the basis of procedure of calculation of parameters of trajectory control of a maritime autonomous surface ships.

Key words: national technology initiative, trajectory control, autonomous vessel, unmanned navigation

УДК.681.51

ГРНТИ 47.05.05

РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ ВИРТУАЛЬНОГО ЛАБОРАТОРНОГО ПРАКТИКУМА ПО РАСЧЕТУ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РЕАКТИВНЫХ ФИЛЬТРОВ С РАЗНЫМИ ВИДАМИ ФИЛЬТРУЮЩИХ ФУНКЦИЙ

З. В. Зайцева

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Рассматриваются вопросы разработки и создания виртуального лабораторного практикума по расчету энергетических показателей реактивных фильтров с разными видами фильтрующих функций на основе использования интегрированной программной среды Mathcad и Fastmean. Разработана методика расчета энергетических показателей фильтров для мощных радиотехнических и преобразовательных устройств, определяющих такие технико-экономические показатели фильтров, как вес, габаритные размеры, стоимость, КПД и стабильность частотных характеристик. Данная методика построена на базе компьютерных технологий, позволяющих проводить моделирование при выполнении лабораторных работ.

лабораторный практикум, реактивные фильтры, энергетические характеристики, интегрированная программная среда, моделирование процессов

Полиномиальные фильтры занимают центральное место в теории электрической фильтрации. К ним относятся широко известные фильтры Баттерворта, Чебышева, Золоторева-Кауэра и другие. Основу для их математического описания составляют полиномы, аппроксимирующие идеальную частотную характеристику и формирующие фильтрующую функцию фильтра. Выражение для ослабления ФНЧ в общем виде можно записать следующим образом:

$$a(\Omega) = 10 \cdot \lg \left(1 + \varepsilon^2 \Psi_n^2(\Omega) \right),$$

где $\Psi_n(\Omega)$ – фильтрующая функция; $\Omega = f/f_0$ – нормированная частота, f_0 – граничная частота полосы пропускания (ПП); $\varepsilon = \sqrt{10^{0.1 \cdot \Delta a} - 1}$ – коэффициент неравномерности; n – порядок фильтра.

Однако помимо частотных характеристик, критически важным аспектом проектирования являются энергетические характеристики фильтра.

Они напрямую определяют не только его эффективность, но и такие физические параметры, как масса и габариты [1, 2]. Чем меньше запасенная энергия, тем легче, компактнее и экономичнее может быть устройство при заданных требованиях к избирательности. В связи с этим вопрос влияния фильтрующей функции фильтра на его энергетические характеристики является актуальным.

Расчет энергетических показателей реактивных фильтров с разными видами фильтрующих функций было предложено провести на основе использования интегрированной программной среды Mathcad и Fastmean. Применение компьютерных технологий в образовании, как известно, дает возможность реализовать более совершенные сценарии взаимодействия между студентом и персональным компьютером (ПК) [3–6].

В лабораторном практикуме студентам были предложены для сравнительного анализа фильтры нижних частот со следующими фильтрующими функциями:

1. Фильтр с максимально плоской характеристикой – фильтр Баттерворта.

Фильтрующая функция имеет вид: $\Psi_n(\Omega) = \Omega^{2n}$.

2. Фильтр с равноволновой характеристикой – фильтра Чебышева.

Фильтрующая функция имеет вид: $\Psi_n(\Omega) = P_n(\Omega)$,

где $P_n(\Omega)$ – полином Чебышева:

$$P_n(\Omega) = \begin{cases} \cos(n \cdot \arccos(\Omega)) & \text{при } |\Omega| \leq 1 \\ \operatorname{ch}(n \cdot \operatorname{arcch}(\Omega)) & \text{при } |\Omega| > 1 \end{cases}$$

3. Фильтр с эллиптической характеристикой – фильтр Золотарева – Кауэра.

Фильтрующая функция имеет вид: $\Psi_n(\Omega) = R_n(\Omega)$,

где $R_n(\Omega)$ – дробь Золотарева:

$$\text{для четных } n: R_n(\Omega) = H_1 \cdot \prod_{v=1}^{0.5 \cdot n} \frac{\frac{1}{k^2 \Omega_{ov}^2} - \Omega^2}{\Omega_{ov}^2 - \Omega^2},$$

$$\text{для нечетных } n: R_n(\Omega) = H_1 \cdot \Omega \cdot \prod_{v=1}^{0.5 \cdot (n-1)} \frac{\frac{1}{k^2 \Omega_{ov}^2} - \Omega^2}{\Omega_{ov}^2 - \Omega^2},$$

где H_1 – нормируемый коэффициент, Ω_{ov} – частота всплесков затухания, $k = 1/\Omega_k$.

Для корректного сравнения фильтров с различными аппроксимирующими функциями были заданы следующие одинаковые требования к харак-

теристике затухания: неравномерность затухания в полосе пропускания (ПП) $\Delta\alpha$; гарантированное ослабление в полосе задерживания (ПЗ) α_0 ; граничная частота полосы пропускания (ПП) f_0 ; нормированная частота $\Omega_k = f_k/f_0$, равная отношению граничных частот полосы задерживания и пропускания. Также задается величина максимальной мощности в нагрузке.

В качестве критерия эффективности рассматривается максимальное значение относительной суммарной реактивной энергии в полосе пропускания.

При выполнении лабораторной работы были поставлены следующие задачи:

- получить характеристики ослабления фильтров, рассчитать суммарную емкость, суммарную индуктивность для всех видов фильтров и провести сравнительный анализ;
- рассчитать энергетические функции фильтров (суммарные энергетические функции по емкостям W_C и по индуктивностям W_L), предварительно сформировав их в формульном виде программе Fastmean, где есть возможность записать функции, определяемые пользователем;
- вывести энергетические функции в виде графиков;
- рассчитать групповое время задержки (ГВЗ), которое в LC-фильтре пропорционально запасенной энергии $\tau(\omega) = \frac{W_C + W_L}{2 \cdot P_{2max}}$, вывести график ГВЗ;
- рассчитать вес и объем фильтров, основываясь на расчете суммарных энергий на реактивных элементах, по формулам:

$$G = \frac{W_L}{\gamma_L^G} + \frac{W_C}{\gamma_C^G}, \quad V = \frac{W_L}{\gamma_L^V} + \frac{W_C}{\gamma_C^V}$$

где $\gamma_L^G = 0.15$ Дж/кг и $\gamma_L^V = 30$ Дж/м³ – удельные энергоемкости катушек индуктивности, а $\gamma_C^G = 0.3$ Дж/кг и $\gamma_C^V = 700$ Дж/м³ – удельные энергоемкости конденсаторов.

В качестве примера рассмотрим результаты, которые должен получить студент при выполнении лабораторной работы. Были заданы следующие требования к характеристике затухания: гарантированное неравномерность затухания в полосе пропускания (ПП) $\Delta\alpha = 1.2494$ дБ; ослабление в полосе задерживания (ПЗ) $\alpha_0 = 40$ дБ; граничная частота полосы пропускания (ПП) $f_0 = 17$ кГц; нормированная частота $\Omega_k = \frac{f_k}{f_0} = 2$. Максимальная мощность в нагрузке равна 2 кВт.

На рис. 1, 3, 5 приведены схемы ФНЧ Баттерворта, Чебышева и Золотарева-Кауэра, удовлетворяющие заданным требованиям к характеристике затухания.

хания. При одинаковых требованиях к характеристике затухания самый высокий порядок $n = 8$ у фильтра Баттерворта, далее идет фильтр Чебышева $n = 5$, а фильтр Золотарева-Кауэра имеет порядок $n = 3$. На рис. 2, 4, 6 приведены характеристики ФНЧ трех видов фильтров в полосе пропускания при $\Delta\alpha=1.2494$ дБ: а) ослабление $a(f)$; б) суммарные энергетические функции по емкостям W_C и по индуктивностям W_L ; в) групповое время задержки (ГВЗ).

Анализ полученных характеристик сводится в табл. 1, 2. По полученным таблицам студент должен сделать вывод, какой из фильтров имеет наилучшие энергетические характеристики и массогабаритные параметры.

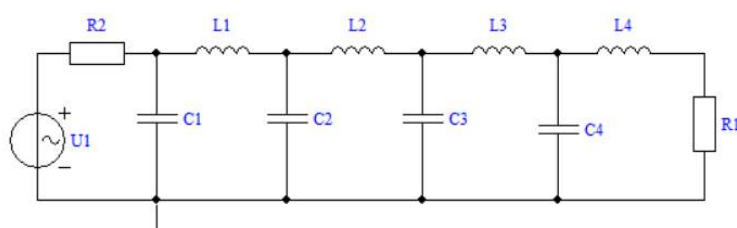


Рис. 1. Схема ФНЧ Баттерворта, $n = 8$

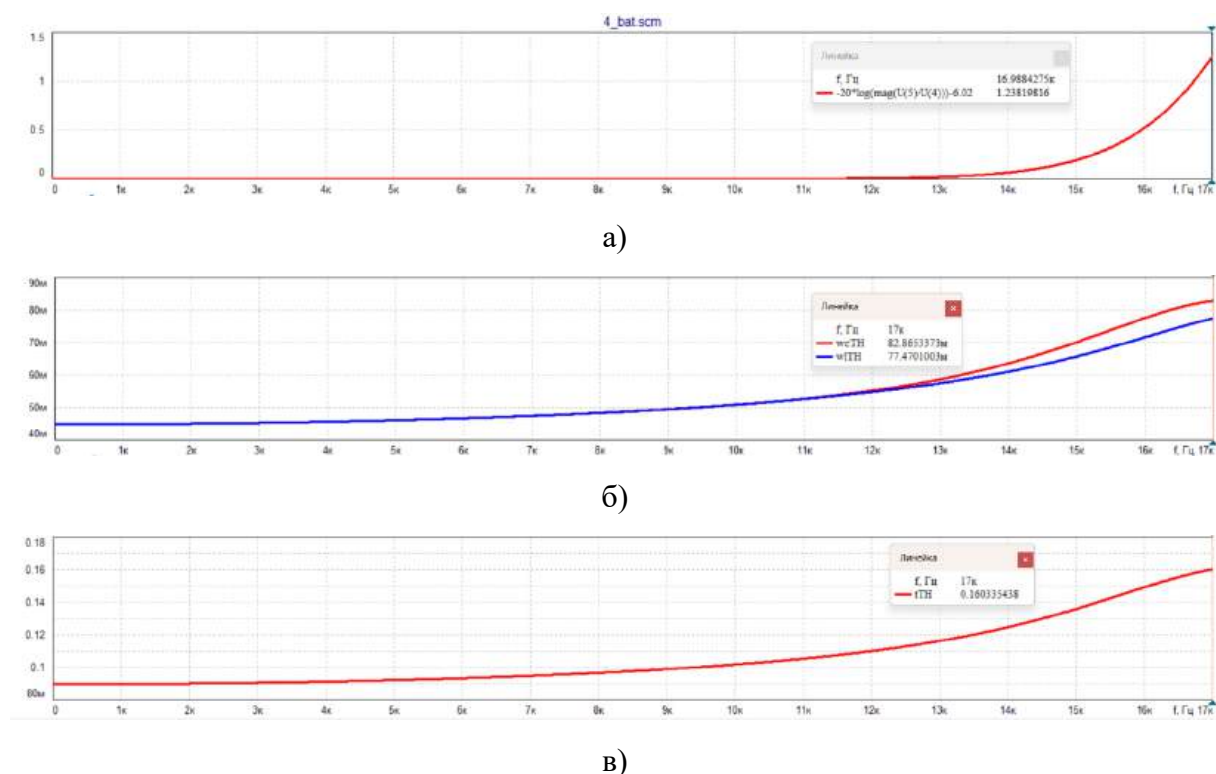
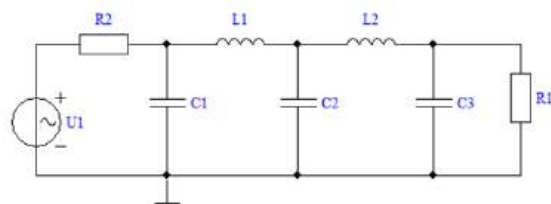
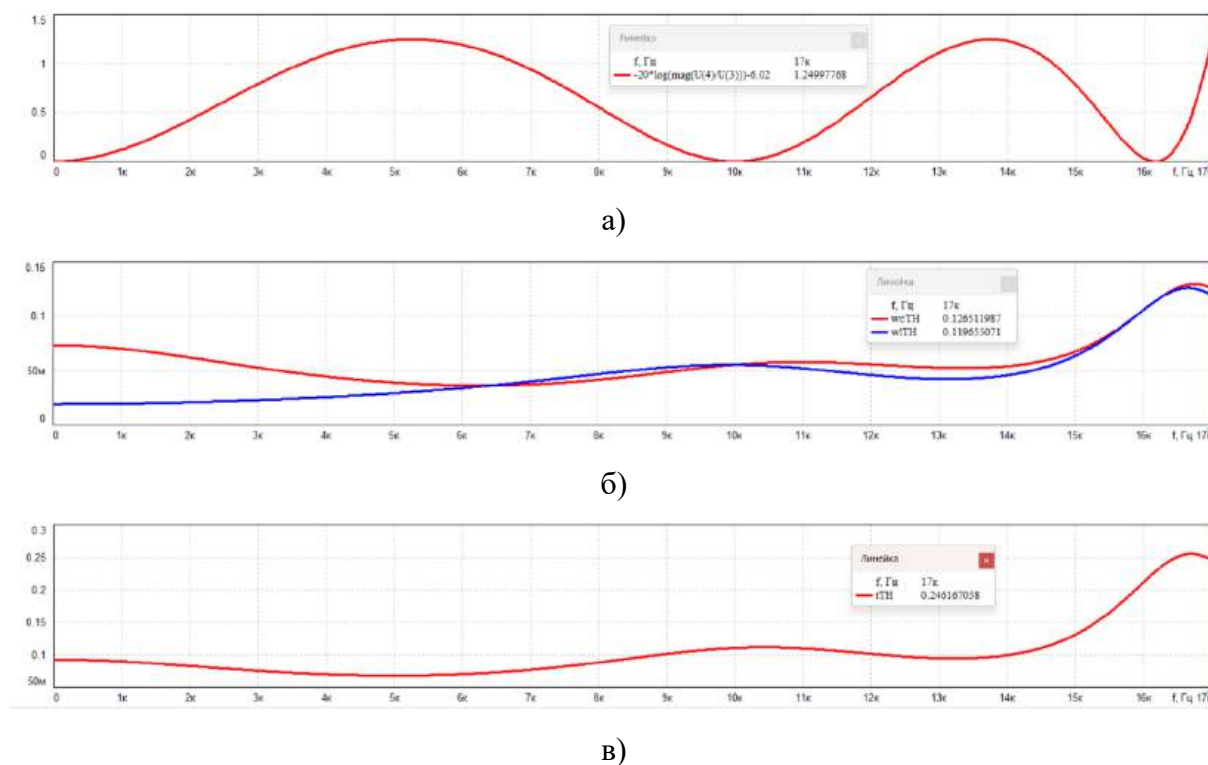
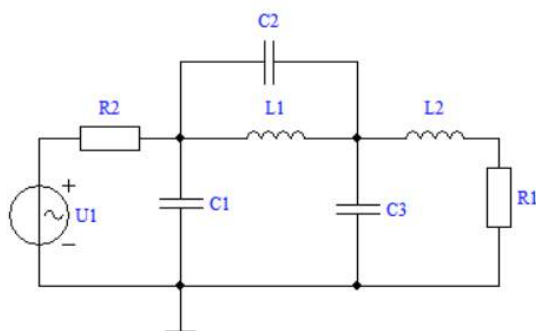
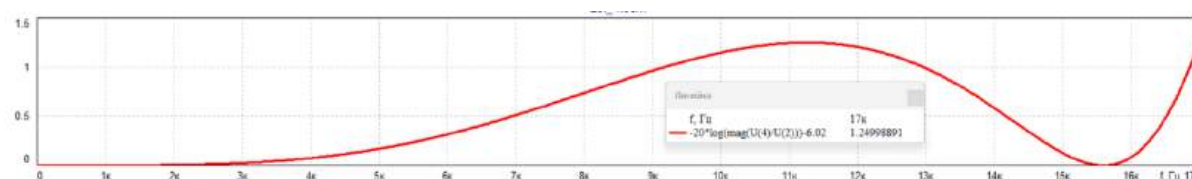
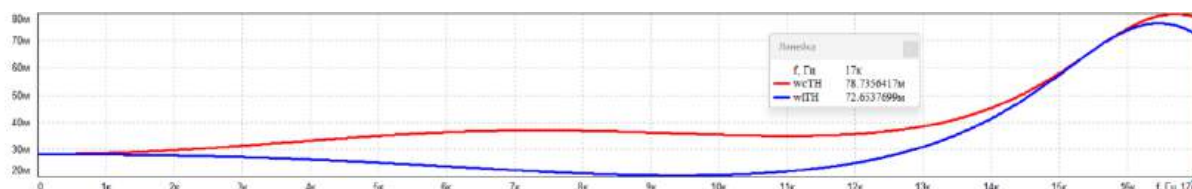


Рис. 2. Характеристики ФНЧ Баттерворта в полосе пропускания при $\Delta\alpha = 1.2494$ дБ:
а) ослабление $a(f)$; б) суммарные энергетические функции по емкостям W_C и по индуктивностям W_L ; в) групповое время задержки (ГВЗ)

Рис. 3. Схема ФНЧ Чебышева, $n = 5$ Рис. 4. Характеристики ФНЧ Чебышева в полосе пропускания при $\Delta a = 1.2494$ дБ: а) ослабление $a(f)$; б) суммарные энергетические функции по емкостям W_C и по индуктивностям W_L ; в) групповое время задержки (ГВЗ)Рис. 5. Схема ФНЧ Золотарева-Кауэра, $n = 3$



а)



б)



в)

Рис. 6. Характеристики ФНЧ Золотарева-Кауэра в полосе пропускания при $\Delta a = 1.2494$ дБ: а) ослабление $a(f)$; б) суммарные энергетические функции по емкостям W_C и по индуктивностям W_L ; в) групповое время задержки (ГВЗ).

ТАБЛИЦА 1. Суммарные индуктивность и емкость, объем и вес при $\Delta a = 1.2494$ дБ

Фильтр нижних частот (ФНЧ)	Порядок	Суммарная индуктивность, мГн	Суммарная емкость, нФ	Вес, кг	Объем, м ³
Баттерворта	8	26.8823	74.6731	0,7927	0,00270
Чебышева	5	11.6292	122.3899	1,227	0,004198
Золотарев- Кауэра	4	16.9289	49.0959	0,7467	0,002534

ТАБЛИЦА 2. Энергетические характеристики и ГВЗ при $\Delta a = 1.2494$ дБ

Фильтр нижних частот (ФНЧ)	Поря- док	Энергия, запасенная в индуктивно- сти, мДж	Энергия, запасенная в емкости, мДж	Суммарная энергия в реактивных элементах, мДж	Групповое время задержки, мкс
Баттер- ворта	8	77.4930	82.8772	160.3702	40.0925
Чебышева	5	119.5213	126.4196	245.9409	61.4852
Золотарев- Кауэра	4	72.5876	78.7033	151.2909	37.8227

Таким образом, виртуальная лабораторная работа по расчету энергетических показателей реактивных фильтров с разными видами фильтрующих функций, выполненная в интегрированной программной среде Mathcad и Fastmean, позволяет наглядно оценить, какой вид имеет LC-реализация реактивных фильтров с разными фильтрующими функциями при одинаковых требованиях к характеристике затухания, как изменяются характеристики затухания и энергетические характеристики фильтров, какие фильтры предпочтительнее для использования. В ходе выполнения лабораторной работы студенты не только применяют усвоенные теоретические знания, но и совершенствуют навыки моделирования, работы со специализированным программным обеспечением, а также приобретают опыт в анализе и проектировании электронных систем.

Список используемых источников

1. Дмитриков В. Ф., Сергеев В. В., Самылин И. Н. Повышение эффективности преобразовательных и радиотехнических устройств. М.: Радио и связь, Горячая линия – Телеком, 2005.
2. Теория электрических цепей. Расчет LC-фильтров с учетом эксплуатационных показателей: учеб. пособие для вузов / В. В. Сергеев. 2-е изд., стер. СПб.: Лань, 2022. 116 с. URL: <https://e.lanbook.com/book/238811>. ISBN 978-5-507-44727-5.
3. Сергеев В. В., Зайцева З. В. Электронные цепи и методы их расчета. Расчет LC-фильтров и сравнительный анализ их показателей активности / Санкт-Петербург, СПбГУТ, 2016.
4. Зайцева З. В., Логвинова Н. К. Компьютерный расчет линейных и нелинейных цепей при постановке виртуальных лабораторных работ // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2019); сборник научных статей VIII Международной научно-технической и научно-методической конференции: в 4 томах. 2019. С. 401-406.

3. Зайцева З. В., Логвинова Н. К. Виртуальный лабораторный практикум для технических дисциплин при дистанционном обучении // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2021); сборник научных статей X Международной научно-технической и научно-методической конференции: в 4 томах. Санкт-Петербург, 2021. С. 218-223.

4. Зайцева З. В., Логвинова Н. К. Возможности человеко-машинного взаимодействия в обучающей среде технического вуза // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2024). Материалы XIII Международной научно-технической и научно-методической конференции. В 4-х томах. Санкт-Петербург, 2024. С. 558-563.

DEVELOPMENT AND CREATION OF A VIRTUAL LABORATORY WORKSHOP FOR CALCULATING THE ENERGY PERFORMANCE OF REACTIVE FILTERS WITH DIFFERENT TYPES OF FILTERING FUNCTIONS

Zaytseva Z.

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

The issues of developing and creating a virtual laboratory workshop for calculating the energy performance of reactive filters with different types of filtering functions based on the integrated software environment Mathcad and Fastmean are considered. A methodology has been developed for calculating the energy performance of filters for high-power radio engineering and converter devices, which determines such technical and economic indicators of filters as weight, overall dimensions, cost, efficiency, and frequency response stability. This methodology is based on computer technologies that enable simulation during laboratory work.

Key words: laboratory workshop, reactive filters, energy characteristics, integrated software environment, process simulation

УДК 537.533

ГРНТИ 47.29.29, 47.09.48

МЕХАНИЗМЫ ФОРМИРОВАНИЯ ЭМИССИОННОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ В ПОЛЕВОМ ЭМИССИОННОМ ПРОЕКТОРЕ С ПЛОСКИМ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫМ ЭКРАНОМ

И. И. Закиров¹, А. Г. Колосько^{1,2}, А. А. Мицкевич¹,
Е. О. Попов², С. В. Филиппов^{2,3}

¹ Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

² Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук

³ Университет Цинхуа, Пекин, КНР

В работе представлено описание механизмов формирования особенностей отсветов на экране полевого эмиссионного проектора. Представлены концепции: взаимодействия электронного потока с люминофором, формирование центрального пятна и паразитного отсвета в форме ореола или гало. Рассмотрены механизмы разлета вторичных электронов в пространстве, включая зарядку люминофора.

полевой эмиссионный проектор, рассеяние электронов, структура единичного отсвета

Полевой эмиссионный проектор является стандартным инструментом исследования многоострижных полевых катодов. Картина, которую дают на люминофоре потоки электронов, (т.н. картина свечения) несет информацию о распределении эмиссионного тока по поверхности катода, о взаимном расположении и активности отдельных эмиссионных центров [1]. Регистрация и слежение за отсветами отдельных эмиттеров позволяет получать их локальные характеристики [2]. Однако интерпретация картин свечения осложнена рядом эффектов [3]. Основные – это разлет электронов в вакууме на пути к аноду, что формирует на картине свечения достаточно широкое *центральное пятно*, а также формирование на люминофоре вокруг этого пятна *паразитного отсвета*, который может иметь форму кольца (*гало*) [4] или равномерно засвеченного круга (*ореола*) [5]. Наложение паразитных отсветов соседних эмиттеров на их центральные пятна добавляет пятнам яркости, что при расчете распределения токовой нагрузки увеличивает их ток, тогда как у других эмиттеров оценка тока уменьшается. Теоретическая мо-

дель формирования отсвета может помочь в корректировке картин свечения и получении правильных оценок локальных характеристик.

Целью данной работы является рассмотрение механизмов формирования светового отклика единичного эмиттера. В качестве основы для расчетов были взяты экспериментальные данные из [5]. Эмиттер – кремниевое острие. Расстояние от вершины острия до анода $d_{A-C} = 370$ мкм, высота острия $h = 200$ мкм, напряжение $U = 2.6$ кВ, ток $I = 34.6$ мкА. Католюминофор – светосостав ZnS:Cu с зеленым свечением. Толщина люминофора $d_{phos} = 10$ мкм. Электрод под люминофором – прозрачный слой ИТО на стекле. Отсвет – пятно радиусом $R_0 \sim 120$ мкм с ореолом, $R_{oreol} \sim 900$ мкм.

Разлет первичных электронов и возникновение свечения

Распределение тока по поверхности анода в области прилета первичных электронов (центральное пятно) имеет профиль, который лучше всего описывается полиномом (центральную часть в первом приближении можно задать распределением Гаусса). Профиль зависит от формы самого острия и от межэлектродного расстояния. Аналитически получить его очень сложно, так как распределение полей в пространстве над анодом подвержено эффекту фокусировки и для его расчета используют специальные программные пакеты, например, COMSOL Multiphysics. В работе [6] представлен профиль кругового распределения тока, рассчитанный для углеродной нанотрубки, а в работе [7] представлен алгоритм получения профиля в условии расчета малого числа траекторий. Особенностью формирования центрального пятна является то, что электроны не разлетаются с вершины эмиттера во все стороны, а разворачиваются полем в сторону анода (двигаются вдоль силовых линий электрического поля, сконцентрированных на вершине эмиттера). Причем резкое падение плотности тока на поверхности катода при движении от его вершины к краю конкурирует с эффектом сгущения траекторий на аноде (при условии равномерности плотности тока на катоде) [7]. В результате плотность тока на аноде имеет пик в области центра пятна.

Связь плотности тока на аноде j с яркостью люминофора B задается через коэффициент светимости люминофора K : $B(j) = K \cdot j$. Однако при больших плотностях тока эта зависимость теряет линейность и приобретает гиперболическую форму с эффектом насыщения:

$$B(j) = B_{sat} \cdot (j/j_{sat}) / (1 + j/j_{sat}), \quad (1)$$

где B_{sat} – предельная яркость, j_{sat} – плотность тока насыщения. Таким образом, при $j \ll j_{sat}$ зависимость линейна ($K = B_{sat}/j_{sat}$), а при $j \gg j_{sat}$ зависимость от j исчезает и яркость становится постоянной $B \sim B_{sat}$.

Плотность тока насыщения j_{sat} зависит от свойств люминофора:

$$j_{sat} \sim e \cdot n_A \cdot d_{phos} / \tau_{lum} \sim 160 \text{ А/м}^2, \quad (2)$$

где n_A – концентрация люминесцентных атомов ($\sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$ при процентном соотношении атомов Cu 0.02 %), d_{phos} – толщина люминофора ($\sim 10 \text{ мкм}$) с размером зерен 4 – 6 мкм, τ_{lum} – время люминесценции (до 1 мс).

Так как плотность тока центрального пятна выше плотности тока в области паразитного отсвета, при повышении напряжения яркость пятна растет медленней, чем яркость отсвета (см. формулу 1). Это часто наблюдается в эксперименте, где плотность тока на аноде j соизмерима с j_{sat} . Например, в работе [8], где ток одиночного эмиттера $I \approx 15 \text{ мкА}$ приходится на центральное пятно радиусом 120 мкм ($j \sim 333 \text{ А/м}^2$).

Формирование паразитного отсвета

Механизм формирования паразитного отсвета был описан в работе [0] как результат рассеяния электронов на люминофоре. Поле между электродами принимается за равномерное, по величине равное полю в конденсаторе с расстоянием между пластинами d_{sep} . В этом случае дальность полета вторичного электрона выражается формулой:

$$r(\theta, E) = 2d_{sep} \cdot \frac{E}{eU} \cdot \sin(2\theta), \quad (3)$$

где θ – угол отскока, отложенный от горизонтали, E – энергия отскочившего электрона, $e \cdot U$ – энергия первичного (U – напряжение между катодом и анодом).

Максимальная дальность получается для упругоотраженных электронов, вылетевших под углом 45° , и равна $r_{max} = 2d_{sep}$. Экспериментально было установлено, что размер пятна гало при всех уровнях напряжения у всех эмиссионных центров катода примерно одинаков и близок к r_{max} [5]. Размытие края ореола можно связать как с формой профиля центрального пятна, так и с энергетическим спектром рассеяния. Для реальных люминофоров ширина спектра энергетических потерь оценивается как $\Delta E / eU \sim 10 - 30 \%$, что приводит к размытию края кольца-ореола на величину $\Delta R \sim 0.2 r_{max}$.

Для получения профиля ореола используем упрощенную модель, в рамках которой рассеяние электронов полагается изотропным (порошковые люминофоры, как правило, дают именно такое распределение), энергия отскока принимается максимальной, а центральное пятно пренебрежимо мало. Тогда угловое распределение рассеянных электронов:

$$g(\theta) = \frac{dn}{d\theta} = \sin(\theta). \quad (4)$$

Анодная плотность тока рассеянных электронов, которая приходится на кольцо $[r, r + dr]$ выражается через производную угла по расстоянию:

$$j_{bs}(r) = \frac{I_{bs}}{2\pi r} \left| \frac{d\theta}{dr} \right| g(\theta) = \frac{I_{bs}}{8\pi d_{sep}} \frac{\sin(\theta)}{r \cdot \cos(2\theta)}, \quad (5)$$

где $\theta = \frac{1}{2} \arcsin\left(\frac{r}{2d_{sep}}\right)$ – угол вылета упругоотраженного электрона, соответствующий расстоянию r , I_{bs} – ток, соответствующий вторичным электронам. Феноменологический коэффициент обратного рассеяния для люминофоров из металлов: $\eta_{BS} \approx 30\%$ [0]. Откуда $I_{bs} = I\eta_{BS} \approx 10.38$ мкА.

На рис. 1 представлена зависимость относительной плотности тока на аноде $j_{bs_{au}} = j_{bs}/(I_{bs}/\pi R_0^2)$, где R_0 – радиус центрального пятна. Резкий пик на краю отсвета представляет собою кольцо (гало), иногда наблюдаемое в экспериментах. Однако в большинстве случаев паразитный отсвет имеет вид равномерного ореола.

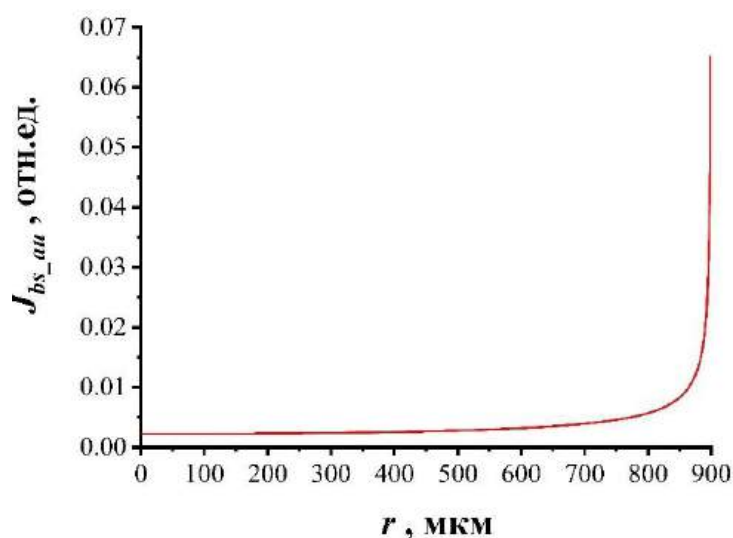


Рис. 1. Распределение упругоотраженных электронов по расстоянию от центра отсвета

Вклад вторичной эмиссии

Истинно вторичные электроны при $U \sim 5$ кВ имеют энергию $\varepsilon_{ВЭ} \sim 50$ эВ, что дает максимальный радиус полета $R_{ВЭ} \approx 7.4$ мкм (см. уравнение (3)). Это на два порядка меньше размера ореола R_{oreol} . Таким образом, истинно вторичные электроны не дают вклад в образование ореола.

Накопление заряда на люминофоре

И первичные и вторичные электроны могут задерживаться на частицах люминофора, впоследствии стекая на электрод ИТО с некоторой скоростью. В состоянии динамического баланса скорость стекания электронов равна скорости их поступления. Однако скопление заряда меняет электрическое поле над люминофором, ограничивая движение вторичных электронов. Это может привести к перераспределению потоков и выравниванию поверхностного потенциала в области паразитного отсвета. Математическая сингулярность на краю графика 1 в таком случае сглаживается и гало может перейти в равномерно светящийся ореол.

Список используемых источников

1. Lysenkov D., Abbas H., Müller G., Engstler J., Budna K. P., Schneider J. J. Electron field emission from carbon nanotubes on porous alumina // Journal of Vacuum Science & Technology B. 2005. Vol. 23. Iss. 2. P. 809–813.
2. Kopelvski M. M., Galeazzo E., Peres H. E. M., Ramirez-Fernandez F. J., Silva D. A. C., Dantas M. O. S., Characterization system based on image mapping for field emission devices // Measurement. 2016. Vol. 93. P. 208–214.
3. Kolosko A. G., Filippov S. V., Popov E. O. Methods for processing field emission glow patterns to obtain the I–V characteristics of individual emission sites // St. Petersburg Polytechnic University Journal. Physics and Mathematics. 2023. Vol. 16, N 1.2. P. 39–46.
4. Bhosale S. V., Suryawanshi S. R., Bhoraskar S. V. [et al.]. Influence of morphology and crystallinity on field emission properties of NiFe₂O₄ nanoparticles grown by high-temperature vapor phase condensation route // Materials Research Express. 2015. Vol. 2, N 9. Art. N 095001.
5. Колосько А. Г., Попов Е. О., Филиппов С. В., Мутыгуллин Б. Э. Анализ картин полевого эмиссионного проектора и вопросы корректного определения локальных токовых характеристик многоострийного катода // Письма в Журнал технической физики. 2024. Т. 50. № 24. С. 26–31.
6. Marchand M., Journet C., Adessi C., Purcell S. T. Ring patterns in high-current field emission from carbon nanotubes // Physical Review B. 2009. Vol. 80, N 24. Art. N 245425.
7. Колосько А. Г., Мутыгуллин Б. Э., Филиппов С. В., Попов Е. О., Соков С. А., Нечаев М. С., Лобанов Б. В., Демин Г. Д., Мицкевич А. А. Моделирование профиля распределения электронов по люминесцентному экрану при исследовании полупроводникового полевого катода // Физика и техника полупроводников. 2025. Т. 59. № 6. С. 319–323.

8. Мутыгуллин Б. Э., Нечаев М. С., Соков С. А., Колосько А. Г., Филиппов С. В., Попов Е. О. Труды Всероссийской конференции «Неделя науки ИЭиТ» (18–23 ноября 2024 г.). СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2024.

9. Никольский К. Н., Батулин А. С., Князев А. И., Чесов Р. Г., Шешин Е. П. Образование колец вокруг первичного автоэмиссионного изображения и возможности их практического использования // Журнал технической физики. 2004. Т. 74. № 2. С. 110–113.

10. Reimer L. Scanning electron microscopy: physics of image formation and microanalysis // Measurement Science and Technology. 2000. Vol. 11. N 12. P. 1826.

MECHANISMS OF EMISSION IMAGE FORMATION IN A FIELD EMISSION PROJECTOR WITH A FLAT FLUORESCENT SCREEN

Zakirov I.¹, Kolosko A.^{1,2}, Mitskevich A.¹, Popov E.^{2,3}, Filippov S.²

¹ The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

² Ioffe Physical-Technical Institute of the Russian Academy of Sciences

³ Tsinghua University, Beijing, PRC

The paper describes mechanisms of formation of the features of glow reflections on the screen of a field emission projector. The represented concepts: interaction of an electron stream with the luminophore, formation of a central spot, and the formation of parasitic reflection in the form of a aureole or halo. The mechanisms of secondary electron scattering in space, including phosphor charging, are considered.

Key words: *field emission projector, electron scattering, the structure of a single glow reflection*

УДК 615.471

ГРНТИ 76.13.19

СУТОЧНЫЙ МОНИТОР АРТЕРИАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ

Р. С. Ибрагимов, С. В. Протасеня

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В современном мире заболеваемость, связанная с изменениями артериального давления, широко распространена и требует постоянного мониторинга и контроля со стороны лечащего врача, в дистанционной форме. Однако существующие приборы вызывают дискомфорт у пациента в повседневной жизни. Цель статьи – подчеркнуть недостатки существующих аппаратов и рассмотреть будущие задачи, а предоставление конструктивного решения прибора для СМАД исследований, обладающего улучшенными характеристиками точки зрения взаимодействия с пациентом, выступающим в роли объекта исследования.

СМАД, АД, ЧСС

Артериальное давление – один из важнейших параметров, характеризующих работу кровеносной системы. Давление крови определяется объемом крови, перекачиваемым в единицу времени сердцем, и сопротивлением сосудистого русла.

Как правило, для измерения АД применяется осциллометрический метод измерения. При сжатии и последующей декомпрессии сосуда изменяется объем тканей под манжетой тонометра. Эти изменения фиксирует автоматический прибор. Внутренняя сторона манжеты – это датчик, который улавливает и регистрирует такие изменения.

В практике заключение по результатам СМАД нередко основывается лишь на анализе средних значений АД и суточном индексе, хотя остальные показатели СМАД, несомненно, несут дополнительную информацию. Тем более сложным является диагностика прегипертензии как пограничного состояния. Перспективным является исследование информативности комплекса всех показателей СМАД, что позволит уточнить диагностику прегипертензии, обеспечит выбор наиболее правильной тактики лечения. Такого рода исследования невозможны без удобного для пациента и точного аппарата для СМАД.

В настоящее время на российском рынке медицинской техники представлено множество приборов для контроля артериального давления, как представлено на рисунке 1, рисунке 2 и рисунке 3.



Рис. 1. Тонометр с универсальной манжетой и адаптером



Рис. 2. Тонометр на запястье для измерения давления, автоматический

Представленные на рынке приборы могут быть как простыми приборами для ручного мониторинга артериального давления, так и приборами разной степени сложности для СМАД.

При измерении АД автоматическими приборами, могут давать результаты измерения с существенными погрешностями, особенно при измерении АД на предплечье и пальцах кисти из-за неточности получаемых значений. Эта проблема особенно актуальна для пациентов, страдающих аритмиями, особенно мерцательной. Все автоматические осциллометрические тонометры у данных больных допускают системную ошибку.

Пример суточного монитора артериального давления, представлен на рисунке 3.



Рис. 3. АД МД-01М

Прибор осуществляет непрерывный мониторинг АД, предоставляет данные о колебаниях давления в течение дня и ночи, а также позволяет врачу выявить более точную картину состояния своего пациента, что является полезным при диагностике и выборе лечения.

Недостатком этого прибора и аналогичных приборов на рынке является наличие двух блоков в составе конструкции: манжеты и самого измерительного блока с насосом.

Поэтому возникает идея изменения конструкции стандартного аппарата СМАД, суть которой кратко можно представить в виде внедрения в саму манжету СМАД насоса, для ее накачки в процессе проведения исследования, что в свою очередь позволит убрать шланг, связывающий монитор с самой манжетой.

Для осуществления такого вида усовершенствования конструкции требуется осуществить расчет и подбор элементов, выбрать способы реализации данного решения.

Итогом работы может стать пример конструктивного решения прибора для СМАД исследований, обладающего улучшенными характеристиками точки зрения взаимодействия с пациентом, выступающим в роли объекта исследования.

Список используемых источников

1. Википедия Кровяное давление. URL:[https://ru.wikipedia.org/wiki/ Кровяное_давление](https://ru.wikipedia.org/wiki/Кровяное_давление) (дата обращения: 02.11.2025).
2. Аксельрод А. С. Современные системы суточного мониторирования АД. URL: <https://www.schiller.ru/profile/articles/smad/145/> (дата обращения: 02.11.2025).
3. Кишов Р. М. Устройство непрерывного неинвазивного мониторинга артериального давления. URL:<https://cyberleninka.ru/article/n/ustroystvo-nepreryvnogo-neinvazivnogo-monitoringa-arterialnogo-davleniya/viewer> (дата обращения: 03.11.2025).

DAILY BLOOD PRESSURE MONITORING DEVICE

Ibragimov R., Protasenya S.

The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

In the modern world, morbidity associated with changes in blood pressure is widespread and requires constant monitoring and monitoring by the attending physician, remotely. However, existing devices cause discomfort in the patient's daily life. The purpose of the article is to highlight the shortcomings of existing devices and consider future challenges.

Key words: SMAD, BLOOD pressure, HEART RATE

УДК 537.533

ГРНТИ 47.29.29, 47.09.48

ЛАБОРАТОРНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ СВОЙСТВ ЭЛЕМЕНТОВ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

А. Г. Колосько, Г. К. Меньшиков, Д. А. Харьков

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Представлена разработка лабораторного стенда, предназначенного для изучения свойств компонентов микроэлектроники. Основная цель – формирование учащимися знаний о свойствах элементов полупроводниковой техники, включая элементы микро- и наноразмеров, освоение принципов сбора и статистической обработки информации, включая обработку в режиме реального времени. Дополнительными задачами являются: изучение особенностей проектирования подобных стендов, освоение инструментов графического программирования (среда LabVIEW), а также оптимизация процесса измерений.

лабораторный стенд, регистрация вольтамперных характеристик, туннельный диод

Современные технологии активно используют микро- и наноразмерные структуры, обычно выполненные посредством литографии. Оборудование для литографических процессов обеспечивают корпорации во главе с нидерландской ASML (Advanced Semiconductor Materials Lithography), которая производит установки с разрешением до 2 нм. Массовым изготовлением чипов занимаются такие гиганты как тайваньская TSMC (Taiwan Semiconductor Manufacturing Company) и южнокорейская Samsung. Созданием и распространением устройств на базе этих чипов занимаются мировые компании Huawei (Китай), Apple (США), Samsung (Южная Корея) и другие [1].

Исторически в России закрепилось два основных направления участия в международной экономике: добыча и предварительная обработка полезных ископаемых (из которых ASML, TSMC и Huawei в итоге создают свои продукты) и разработка проектов мирового масштаба, таких как сверхпроводящий коллайдер NICA, вакцина «Спутник V», ракетный двигатель «Плазменное сердце», пассажирские лайнеры типа MC-21 и дизельные ледоколы (в общем-то на вырученные от продажи ресурсов деньги). Конкурентоспособное развитие электронной техники, к сожалению, было только во времена СССР. Несмотря на это, основным ресурсом России остаются

специалисты, обладающие широким спектром знаний и навыков, в частности благодаря тому, что предмет «Микро и нанотехнологии» существует едва ли не в каждом высшем учебном заведении.

Изучение основ микротехнологий в учебных заведениях осложнено, с одной стороны, требованием наличия специального оборудования, включая химреактивы (так как литография основана на химическом травлении). А с другой стороны, изучение основ электрических процессов, происходящих в микрочипах, также требует особого оборудования, включая микроскопы высокого разрешения и высокочастотные анализаторы. В связи с этим обычно лабораторная часть изучения дисциплины происходит в режиме компьютерного моделирования, с применением высокопроизводительных компьютеров и специальных учебных программ.

Целью представленного проекта является разработка портативного модуля регистрации характеристик элементов электроники, созданных с помощью микротехнологий и работающих на принципах микроэлектроники.

Например, изучение учащимися свойств и принципов работы таких элементов, как туннельный диод, позволит им опосредованно освоить принципы работы сложных тонкопленочных структур, которые используются в современных нанотехнологиях. Туннельный диод основан на переходе электронов через границу раздела двух полупроводников, который относится к области квантовой физики и называется туннельным эффектом. На этом же эффекте работает широкий класс микроскопических элементов в составе современных чипов, включая ячейки памяти. Вольтамперная характеристика туннельного диода (ВАХ) обладает характерным S-образным изгибом, в области которого наблюдается отрицательное дифференциальное сопротивление, вызванное туннельным эффектом. Таким образом, регистрация обычной ВАХ позволяет наблюдать и даже оценивать параметры эффекта, который применяется в современных нанотехнологиях.

В качестве таких радиодеталей можно использовать: 1) туннельный диод, например, ЗИ306Г (туннелирование через запрещенную зону на границе двух полупроводников, используется в высокочастотных усилителях); 2) диод Ганна, например, ЗА726А (эффект высокочастотных осцилляций тока, применяются как генераторы эталонных частот в СВЧ технике); 3) элемент Пельтье, например, ТЕС1-12706 (термоэлектрический эффект Пельтье, используется в системах охлаждения и нагрева); 4) термопара, например, ТХА-0187 (термоэлектрический эффект Зеебека, связанный с выравниванием уровня Ферми при контакте сред с разными работами выхода,

используется в датчиках температуры). Все эти элементы выполняются не только в микроскопическом масштабе, но и в макроскопических размерах в форме радиодеталей с THT или SMD монтажом, и в то же время демонстрируют свойства, связанные с особенными квантовыми эффектами, которые широко применяются в области микроэлектроники.

На стадии научных разработок находятся элементы: 5) резонансно-туннельный диод RTD (эффект резонансного туннелирования через квантовую яму, применяется в высокоскоростных логических схемах); 6) туннельный транзистор TFET (эффект туннелирования зона-зона с управляемым потенциальным барьером, применяется в энергоэффективных процессорах и микроконтроллерах IoT); 7) элемент СКВИДа (эффект Джозефсона, используется в кубитах квантовых компьютеров). Такие «радиодетали» могут быть получены в рамках сотрудничества с исследовательскими лабораториями.

Основная идея проекта – создание портативного комплексного стенда, в котором будут реализованы следующие учебные задачи: 1) выбор исследуемого образца (элемент) и изучение теоретических основ его работы, включая изучение микроскопических аналогов этого элемента в составе современных чипов; 2) изучение принципа работы измерительного стенда, включая детали реализации его схем и плат (для этого корпус стенда предлагается сделать прозрачным); 3) подготовка портативного измерительного стенда к работе – подключение к сети и к настольному компьютеру (USB порт и/или беспроводная связь), а также установка тестового элемента (какой-нибудь простой полупроводниковый диод для отладки системы) в измерительную ячейку; 4) подготовка или создание по инструкции программы регистрации сигналов, поступающих от стенда к компьютеру, (предлагается использовать платформу графического программирования LabVIEW); 5) тестовая проверка работоспособности собранной пары «стенд – рабочая станция» (возможно сравнение полученных характеристик тестового элемента с литературными данными); 6) установка выбранного элемента в измерительную ячейку и регистрация серии вольт-амперных характеристик (ВАХ); 7) анализ полученных данных (в том числе в режиме реального времени в ходе регистрации серии ВАХ).

Таким образом стенд не только позволяет дать представление о принципах работы определенного класса микроскопических элементов, но также обеспечивает возможность изучить принципы сбора и статистической обработки информации, освоить инструменты графического программирования, узнать особенности проектирования измерительных стендов. В качестве до-

полнительных заданий планируется добавить: 8) оптимизацию измерительного процесса с помощью моделирования электрических схем стенда в соответствующих программах (предлагается встроить несколько регулируемых элементов, типа варисторов); 9) расчет тепловых или других характеристик измеряемого элемента с помощью отдельных программных пакетов; 10) моделирование электрических процессов в исследуемом элементе на основе принципов зонной теории (расчет плотности носителей заряда в зоне проводимости методами численного интегрирования и т.д.).

Компактная конструкция стенда представляет собой небольшой блок (размером не больше осциллографа). Подключение к сети – через внешний или встроенный блок питания. Установка измеряемого элемента – посредством коммутации штыревыми разъемами или же коммутации к ZIF-разъему отдельного блока с установленным в нем элементом. Подключение к компьютеру – через USB порт кабелем или же по беспроводной связи (Bluetooth).

Быстрое измерение серии ВАХ обеспечит сканирование образца пилообразными или полусинусоидальными импульсами (т.н. метод непрерывной волны) с частотой питающей сети (один импульс за 20 мс). Получаемое семейство ВАХ обеспечивает возможность усреднения сигналов с получением более точных характеристик и оценкой их разброса. Влияние на результаты измерений радиотехнических помех, таких как вклад входной емкости измерительных плат, представляет собой тему для дополнительного анализа, который может быть также использован в учебном процессе.

Основные компоненты стенда предполагается изготовить в виде отдельных модулей-плат: генератор сканирующих импульсов (подача на образец напряжения), измерительная цепь (понижение измеряемых сигналов до уровня регистрации АЦП), микроконтроллер (многоканальная АЦП с синхронизацией), USB коннектор (внешний порт), плата беспроводной передачи данных (Bluetooth модуль), отдельный порт для программирования микроконтроллера (тоже USB). Портативность и модульность стенда обеспечат ему высокую ремонтпригодность и заменяемость компонентов.

Следует отметить, что существующие на сегодняшний день анализаторы ВАХ (осциллографы с подключением к компьютеру, многофункциональные цифровые мультиметры, универсальные анализаторы и т.д.) не обладают описанным выше функционалом. Кроме того, существует ныне уже аннулированный патент, на похожую схему измерения [2], однако это устройство также не выполняет заявленных нами функций. В то же время

низкая стоимость компонентов стенда позволяет масштабировать его производство в будущем.

На рис. 1 представлена схема взаимодействия основных узлов прототипа стенда; на рис. 2 – результаты измерения S-образной ВАХ туннельного диода.

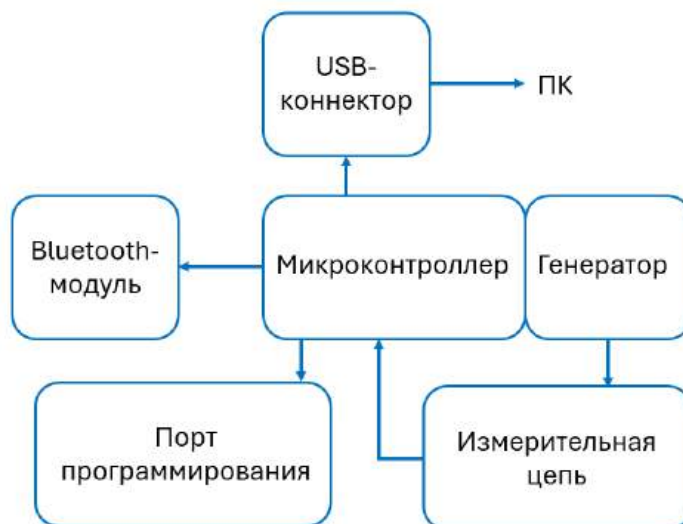


Рис. 1. Схема модулей портативного стенда по измерению ВАХ радиодетали

В качестве ядра стенда (микроконтроллера) был выбран чип ATmega328P, который обладает рядом преимуществ: поддержка АЦП, UART и SPI интерфейсов, наличие исполнения микросхемы в DIP-корпусе позволяет использовать микросхему на плате «Breadboard», что упрощает проектирование на стадии разработки (в дальнейшем будет переход к SMD на общей плате, что занимает меньше места), возможность программирования микроконтроллера на языке C с применением средств разработки Atmel Studio [3].

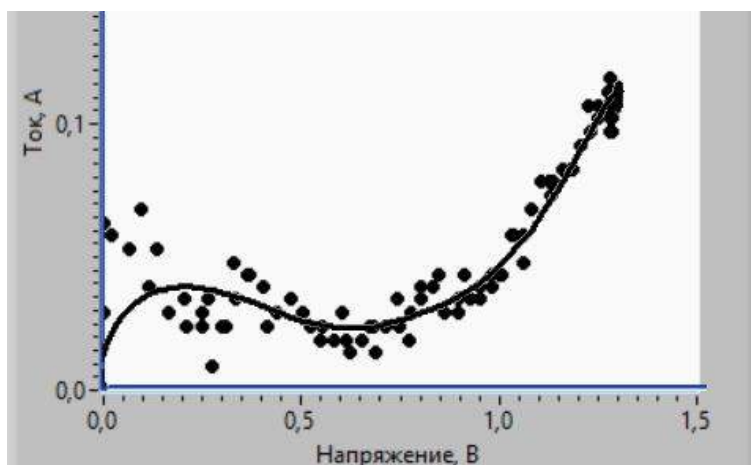


Рис. 2. ВАХ туннельного диода, полученное с помощью прототипа стенда

В настоящее время прототип стенда находится на стадии корпусирования: разработка и создание корпуса с применением 3D печати.

В дальнейшем будет осуществлен ряд улучшений конструкции: оптимизация корпуса с использованием прозрачного пластика, оптимизация программы микроконтроллера, проведение тестовых испытаний, корпусирование измеряемых элементов и создание разъемных соединений, написание и оптимизация программы, собирающей данные.

Список используемой литературы

1. Богатырев А. М. Стратегии адаптации компаний на примере индустрии полупроводников для достижения технологического суверенитета // Московский экономический журнал. 2026. № 1. С. 76. DOI: 10.55186/2413046X_2026_11_1_4.
2. Патент №172271 Российская Федерация, МПК G01R 31/26 (2014.01). Установка для динамического измерения вольтамперной характеристики туннельных диодов: №2016145141: заявл. 18.11.2016: опубл. 03.07.2017 / Ким Дин Чер, Саяпин Сергей Григорьевич, Татаринов Павел Семенович, Томский Кирилл Олегович. – 5 с.
3. Microchip Technology Inc. ATmega328P: 8-bit AVR Microcontroller with 32K Bytes In-System Programmable Flash / Microchip Technology Inc. Rev. 40002074A. URL: https://ww1.microchip.com/downloads/aemDocuments/documents/MCU08/Product Documents/DataSheets/ATmega328P_Prelim_DataSheet_40002074A.pdf.

LABORATORY STAND FOR STUDYING THE PROPERTIES OF MICROELECTRONICS ELEMENTS

Kolosko A., Menshikov G., Kharkov D.

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

The development of a laboratory stand designed to study the properties of microelectronics components is presented. The main goal of the study is to help students understand the properties of semiconductor technology elements, including those of microscopic size, and to learn how to collect and process information statistically, including real-time processing. Secondary objectives include learning how to design such systems, mastering graphical programming tools (such as LabVIEW), and optimizing the measurement process.

Key words: *laboratory stand, recording of current-voltage characteristics, tunnel diode*

УДК 621.372.622
ГРНТИ 47.14.13

ТОПОЛОГИЯ БАЛАНСНОГО МОСТА СВЧ-ДИАПАЗОНА НА ОСНОВЕ НАПРАВЛЕННОЙ ФИЛЬТРУЮЩЕЙ СТРУКТУРЫ

А. Н. Коробейников, А. Э. Ланда

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В работе представлены результаты анализа балансной схемы делителя мощности СВЧ диапазона, построенной на основе направленных фильтрующих структур с кольцевым резонатором бегущей волны, обеспечивающих высокую изоляцию между входными портами в широкой полосе частот. Приведены результаты электродинамического моделирования. Для валидации результатов моделирования был изготовлен и исследован макет устройства, приведены результаты исследования частотных характеристик, а также общие свойства изготовленного макета.

балансный мост, направленные фильтры, делители мощности, кольцевые резонаторы бегущей волны

На сегодняшний день практически ни одна система связи не обходится без устройств частотного преобразования и частотной селекции. Широкий спектр условий применения данных систем, в некоторых случаях, может делать использование стандартных решений не оптимальным, что создает необходимость исследования новых топологий с отличающимися свойствами.

Направленные структуры на основе связанных линий, такие как направленные ответвители (рис. 1) или направленные фильтры, строятся на принципе ответвления мощности в определенный порт [1], в зависимости от направления распространения электромагнитных колебаний в питающей линии передачи. Для каждого входного порта, будет один гальванический, являющийся прямым продолжением линии передачи, один связанный и один изолированный порт. Данное свойство обычно применяется в измерителях коэффициента стоячей волны (КСВ), помогая отделить мощность прошедшей волны от мощности отраженной волны направив их на разные выходные порты. Полезной особенностью таких структур является малое влияние на питающую линию передачи вне рабочей полосы частот.

Направленные фильтрующие структуры, или направленные фильтры на основе связанных линий (рис. 2), в целом повторяют функционал направленных ответвителей, с той лишь разницей, что имеют более выраженную частотную селективность, а также значительно более высокий уровень связи с питающей линией при той же конфигурации зазора и линий передачи.

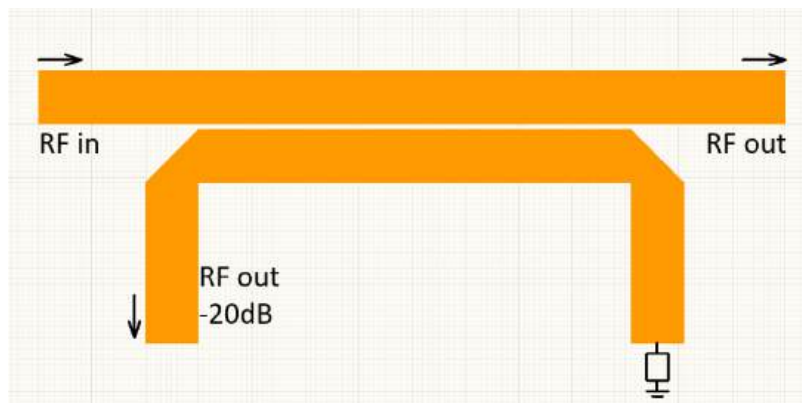


Рис. 1. Направленный ответвитель на связанных линиях

Достигается это за счет кольцевого резонатора, в котором возбуждается направленное распространение электромагнитных колебаний или режим бегущей волны. Часть переданной энергии электромагнитного колебания проходит по периметру резонатора и ответвляется обратно в линию передачи через тот же участок связи, но противофазно колебанию, которое не ответвилось, взаимно уничтожаясь вместе с ним [2]. Таким образом, доля энергии, прошедшей мимо резонатора, уменьшается, соответственно повышается доля переданной в резонатор. После чего, энергия таким же образом снимется с резонатора при помощи другой, электромагнитно связанной с резонатором линии передачи. При этом сохраняется расположение изолированных и связанных портов, а разность фаз на входе и выходе структуры пропорциональна электрической длине, которая в свою очередь зависит от расположения связанных линий друг относительно друга по периметру резонатора.

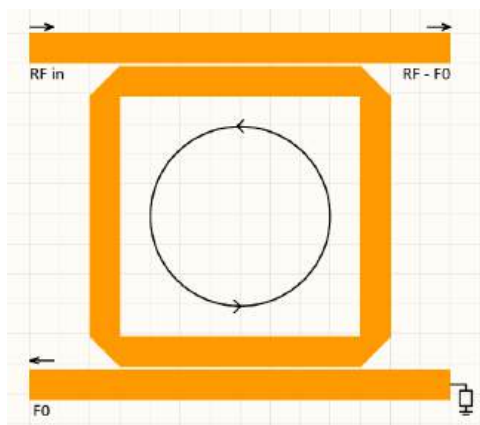


Рис. 2. Направленный фильтр на основе связанных линий и кольцевого резонатора бегущей волны

Была выдвинута гипотеза, что, используя данное явление, возможно создать балансную структуру делителя мощности с повышенной развязкой между портами и частотно-селективными свойствами.

Данный результат достигается за счет внесения дополнительных связанных линий передачи на противоположных участках кольцевого резонатора, которые используются для снятия балансного сигнала. Исходные две линии передачи используются для подключения источников на взаимно изолированные порты и согласованной нагрузки на гальванические порты (рис. 3).

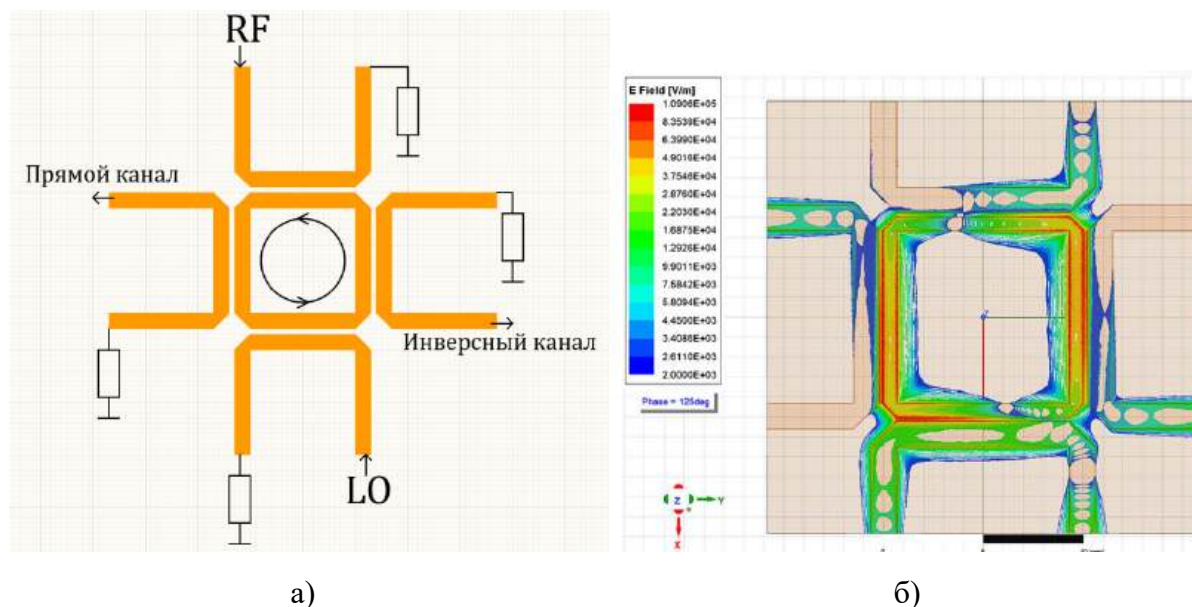


Рис. 3. Предложенная топология балансного делителя мощности (а); результаты моделирования распределения напряженности электрического поля (б)

Для проверки гипотезы было проведено электродинамическое моделирование и изготовлен макет устройства.



Рис. 4. Полученные в результате эксперимента характеристики изготовленного макета. Фиолетовый и синий графики – передача сигнала на выходные порты, зеленый – передача сигнала между входными портами.

Проведенные экспериментальные измерения характеристик подтвердили справедливость электродинамической модели и выдвинутой гипотезы.

Для выходных портов структуры наблюдаются выраженные фильтрующие свойства, а между входными существенная изоляция более 37 дБ в широкой полосе частот (рис. 4). Общие характеристики макета представлены в таблице 1.

ТАБЛИЦА 1. Общие характеристики изготовленного макета

Характеристика устройства	Измеренное значение
Центральная рабочая частота	2,1 ГГц
Рабочая полоса по уровню –3 дБ от максимума передачи	120 МГц
Коэффициент передачи в рабочей полосе	не хуже –4,3 дБ
Максимальная амплитудная ошибка между выходными плечами	0,5 дБ
Максимальная фазовая ошибка между выходными плечами	0,4°
Развязка входных портов	более 37 дБ
Полоса, в которой развязка входных портов не хуже 20 дБ	5,95 ГГц, 290 %
Полоса, в которой КСВН не превышает 1,3	3,17 ГГц, 155 %

В результате исследования была подтверждена высказанная гипотеза, однако требуют отдельного внимания выявленные повышенные потери порядка 4,3 дБ, связанные с распределением части энергии в терминированные порты, а также амплитудная ошибка между выходными портами порядка 0,5 дБ во всем рабочем диапазоне, которая может быть существенной при использовании структуры в качестве балансного делителя мощности. Тем не менее, экспериментальное исследование показало высокую развязку между входными портами в широкой полосе частот, а также подавление полосы пропускания на удвоенной частоте, что может быть полезно для построения преобразователей частот, использующих удвоенные гармоники гетеродина. Также наблюдается изоляция портов от потенциально генерируемых спектральных составляющих, направленных от нелинейных элементов обратно к делителю мощности. Дальнейшие исследования направлены на уменьшение фазовой ошибки, а также потерь в делителе.

В заключение, авторы выражают благодарность Э. Ю. Седышеву за помощь в осуществлении данной работы.

Список используемых источников

1. Matthaei G. L. Microwave Filters, Impedance-Matching Networks, and Coupling Structures / G. L. Matthaei, L. Young, E. M. T. Jones. Dedham: Artech House, 1980. 1096 p.
2. Morgan M. A. Reflectionless Filters / M. A. Morgan. Boston: Artech House, 2017. 280 p.

**TOPOLOGY OF A BALANCE BRIDGE FOR THE RADIO FREQUENCY BASED
ON A DIRECTIONAL FILTERING STRUCTURE**

Korobeinikov A., Landa A.

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

The paper presents the results of the analysis of the balanced circuit of the microwave power divider, based on the directional filtering structures with a ring traveling wave resonator, providing high isolation between the input ports in a wide frequency band. The results of electrodynamic modeling are presented. To validate the modeling results, a prototype of the device was manufactured and experimentally investigated, and the results of the experiment, as well as the general properties of the manufactured prototype, are presented.

Key words: *balanced bridge, directional filters, power dividers, traveling wave ring resonators*

УДК 621.396.969.181.24

ГРНТИ 47.45.29

АНАЛИЗ И ПРИМЕНЕНИЕ КОМБИНИРОВАННЫХ МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ РАЗВЯЗКИ МЕЖДУ КАНАЛАМИ В АНТЕННОЙ РЕШЕТКЕ МІМО – РАДАРА

К. О. Коровин, В. А. Макаров

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Работа посвящена методам достижения высокой развязки между излучателями в приеме-передающей антенной решетке МІМО-радаров ($Tx \cdot Rx$) 2×8 . Рассмотрены различные методы подавления паразитных связей, в том числе периодические электромагнитные структуры и поглотители. Представлена модель в среде CST Microwave Studio, выполнена оптимизация геометрии, приведены результаты измерений макета. Показано, что предложенные решения обеспечивают развязку не хуже -46 дБ, что удовлетворяет минимальным системным требованиям.

МІМО-радар, ЦАР, взаимное влияние

Введение

МІМО-радары (Multiple Input Multiple Output) находят широкое применение в автомобильных системах помощи водителю, промышленной автоматизации и охранных комплексах [1]. Использование нескольких передающих и приемных антенн позволяет формировать виртуальную апертуру, повышая угловое разрешение без увеличения физических размеров решетки. Одной из ключевых проблем при построении таких систем является взаимная связь между излучателями. Мощный сигнал передатчика, просачиваясь непосредственно в приемный тракт, способен вызвать ограничение в аналого-цифровом преобразователе (АЦП), что резко снижает динамический диапазон радара.

Цель данной работы – разработка конструкции антенной решетки, обеспечивающей развязку между передающими и приемными элементами на уровне, гарантирующем линейную работу приемного тракта. В первой части статьи рассмотрены методы снижения взаимной связи. Во второй части проведено численное моделирование используемых методов. В третьей части произведена экспериментальная проверка.

Актуальность

Современные ММО-радары миллиметрового и сантиметрового диапазонов работают с широкополосными сигналами и требуют большого динамического диапазона для обнаружения малоразмерных целей на фоне интенсивных помех. Применение 12-битных АЦП накладывает жесткие ограничения на допустимый уровень помехи на входе приемника – превышение порога ведет к потере информации. В то же время тенденция к миниатюризации антенных систем сокращает расстояния между элементами решетки, что обостряет проблему электромагнитной совместимости. Поиск компактных и технологичных решений для подавления паразитных связей остается актуальной задачей.

1. Методы снижения взаимной связи

Одной из ключевых проблем при проектировании антенных решеток ММО-радаров является взаимная связь между передающими и приемными каналами. При малом расстоянии между антеннами часть энергии передатчика напрямую попадает в приемный тракт. Это приводит к росту собственного шума системы, перегрузке малошумящих усилителей и ограничению динамического диапазона приемника. Особенно критична данная проблема для систем с высокой выходной мощностью передатчика и чувствительными приемными каналами.

Для уменьшения взаимной связи применяются различные методы подавления паразитного излучения от простых экранов до сложных электродинамических структур. Наиболее распространенными являются:

- металлические экраны и перегородки;
- структуры с деформированным заземлением (DGS – Defected Ground Structure), структуры электромагнитной запрещенной зоны (EBG Electromagnetic Band Gap), высокоимпедансные структуры (HIS High Impedance Surface);
- радиопоглощающие материалы.

Металлические экраны и перегородки

Наиболее простым методом является установка металлических перегородок между антеннами. Эффективность такого метода зависит от:

- высоты перегородки;
- расстояния до антенн;
- материала конструкции.

Недостатком метода является ухудшение диаграммы направленности при слишком большой высоте экрана, а также увеличение габаритов антенной системы.

DGS, EBG, HIS структуры

К современным электродинамическим методам снижения взаимной связи между антеннами относятся DGS, EBG и HIS структуры.

DGS-структуры представляют собой локальные нарушения металлизации заземляющего слоя печатной платы. Такие элементы изменяют распределение поверхностных токов и формируют эквивалентный режекторный фильтр для поверхностных волн [2]. На практике применяются щелевые, меандровые и гантелеобразные структуры.

EBG-структуры являются периодическими электромагнитными структурами, создающими запрещенную зону распространения поверхностных волн в определенном диапазоне частот [3].

HIS-структуры представляют собой высокоимпедансные поверхности, обладающие свойствами искусственного магнитного проводника [4]. Вблизи резонансной частоты такие поверхности подавляют поверхностные токи и уменьшают уровень паразитного взаимодействия между антеннами.

Во многих практических случаях DGS, EBG и HIS рассматриваются как близкие по принципу действия методы, так как все они изменяют условия распространения поверхностных электромагнитных волн в структуре печатной платы.

Радиопоглощающие материалы

Дополнительное подавление паразитных сигналов может быть достигнуто использованием радиопоглощающих материалов. К основным видам можно отнести:

- ферритовые поглотители;
- углеродсодержащие композиты;
- вспененные радиопоглощающие материалы.

Основными преимуществами данного метода являются: широкополосность, простота применения, возможность комбинирования с экранами.

2. Модель для расчета в CST

Численное моделирование выполнялось в пакете CST Microwave Studio. Объектом исследования служила линейная решетка из двух переда-

ющих и восьми приемных каналов с центральной рабочей частотой 5,7 ГГц. Модель включала систему питания и разъемы.

На первом этапе исследования производилась оценка максимально достижимой развязки только за счет пространственного разнеса антенн без применения дополнительных методов подавления паразитной связи. Расстояние между элементами выбиралось исходя из ограничений по габаритам системы и требований к формированию диаграммы направленности. Полученные результаты показали, что при компактном расположении элементов уровень взаимной связи остается недостаточным для обеспечения требуемого динамического диапазона приемного тракта. Результаты моделирования представлены на рис. 1.

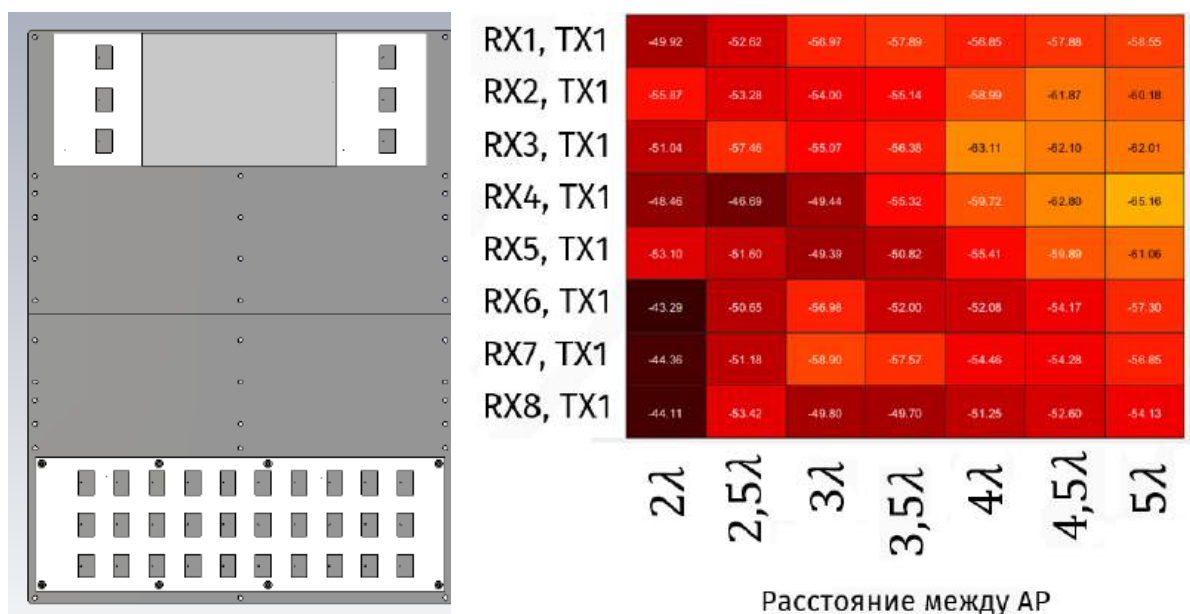


Рис. 1. Изменение расстояния между приемными и передающими каналами без использования методов увеличения развязки

Далее в модель были добавлены металлические перегородки между передающими и приемными каналами. Основной задачей являлся подбор оптимальной геометрии перегородок, обеспечивающей максимальное снижение коэффициента передачи без существенного ухудшения характеристик диаграмм направленности приемных и передающих каналов.

В ходе моделирования было определено, что, учитывая доступные габариты системы и оптимальные характеристики передачи высота ребер должна составлять 14 мм, а шаг между ними $\lambda/2$. Далее изменялось расстояние между антеннами с шагом $\lambda/2$, и добавлением перегородок (рис. 2).

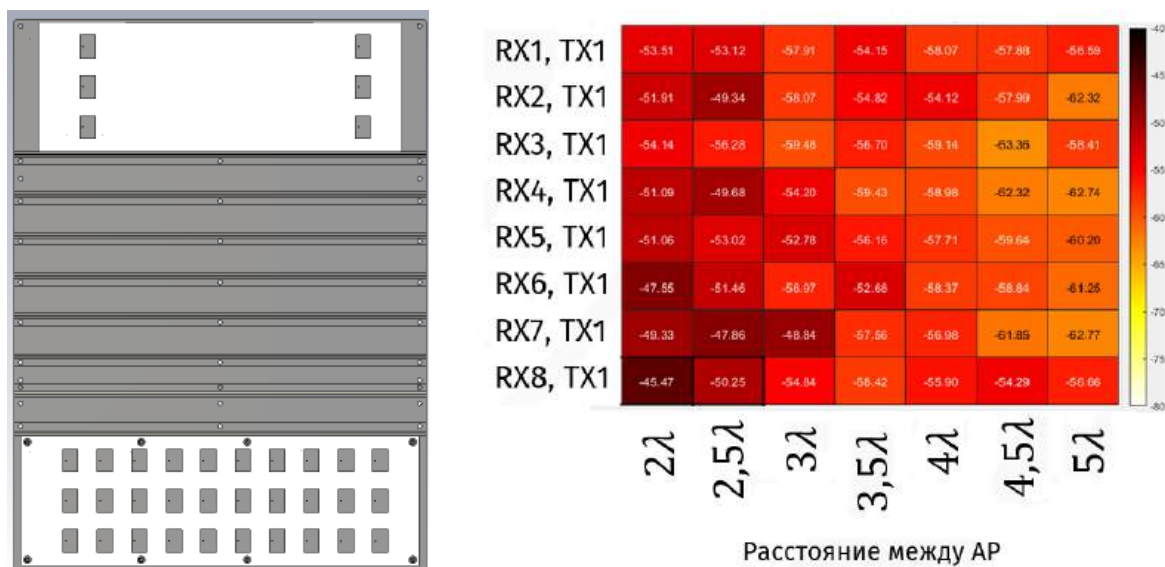


Рис. 2. Изменение расстояния между приемными и передающими каналами с добавлением металлических ребер

На следующем этапе исследовалось комбинированное применение металлических перегородок и радиопоглощающего материала. В качестве поглотителя был выбран лист широкополосного поглотителя СВЧ-энергии ЗИПСИЛ 601 РПМ-01 [5] высотой 2 мм. Поглотитель размещался в зазорах между металлическими экранами с целью дополнительного подавления поверхностных волн и уменьшения переотражений электромагнитной энергии внутри конструкции. Результаты моделирования представлены на рис. 3.

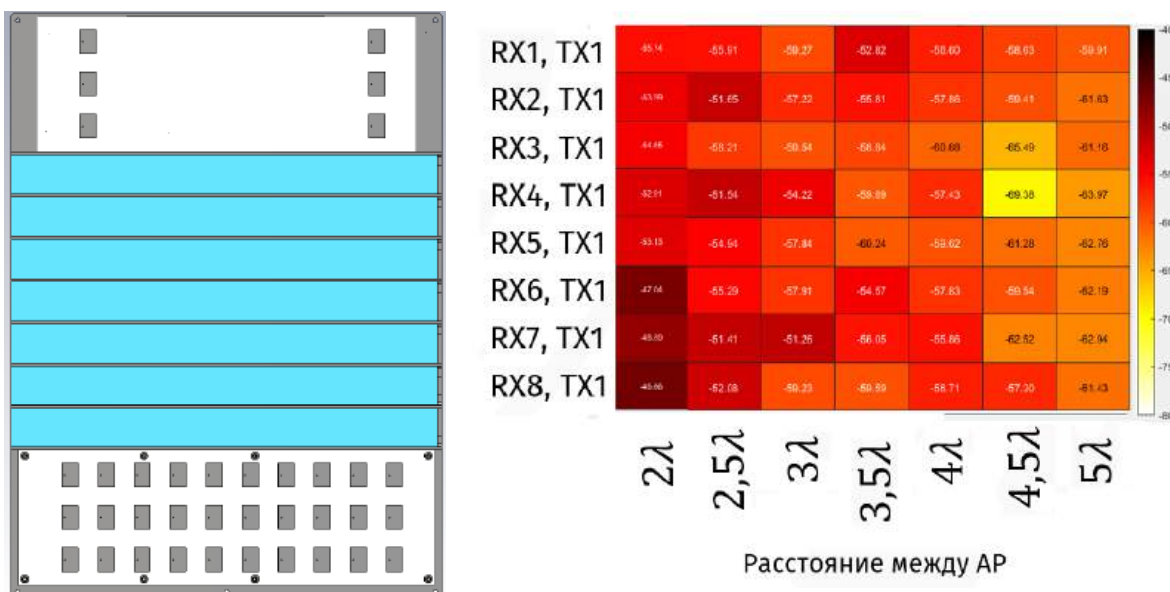


Рис. 3. Изменение расстояния между приемными и передающими каналами с добавлением металлических ребер и радиопоглощающего материала

Моделирование показало, что применение поглотителя позволяет дополнительно снизить уровень паразитной связи на несколько децибел по сравнению с использованием металлических перегородок.

Полученные результаты показали, что комбинированное применение металлических перегородок и радиопоглощающего материала обеспечивает существенное снижение взаимной связи без ухудшения характеристик диаграмм направленности приемных и передающих каналов.

3. Результаты измерений

Для подтверждения результатов численного моделирования был изготовлен экспериментальный макет антенной решетки 2×8 , включающий передающие и приемные антенны, выполненные на печатной плате с рабочей частотой 5,7 ГГц. Конструкция макета была изготовлена в соответствии с моделью, использованной в CST Microwave Studio, включая систему питания, разъемы и элементы экранирования.

Экспериментальные исследования проводились с целью оценки фактического уровня взаимной связи между каналами при использовании конструкции, которая показала наилучшие результаты в ходе моделирования. Результаты измерения представлены на рис. 4.

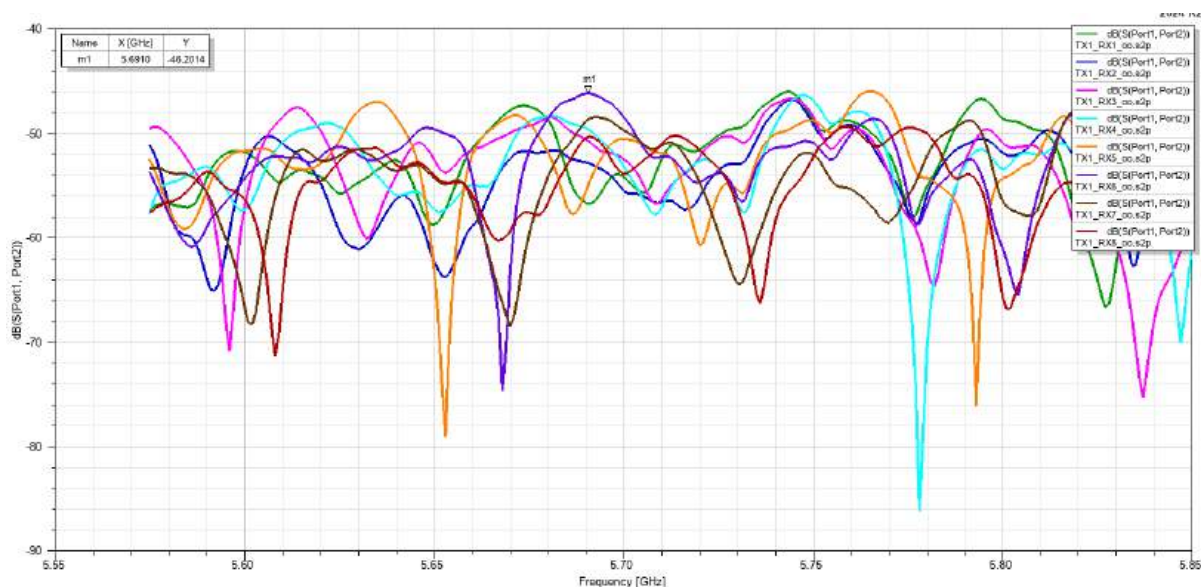


Рис. 4. Результаты измерения макетного образца

Сравнение экспериментальных данных с результатами моделирования в CST Microwave Studio показало расхождение между расчетными и измеренными значениями порядка 10 дБ, что обусловлено: технологическими допусками при изготовлении печатной платы; влиянием разъемов и кабельных соединений; паразитными отражениями в измерительной установке.

Выводы

В представленной работе проведено исследование различных методов обеспечения развязки. С целью повышения уровня развязки были рассмотрены различные методы и применена комбинация двух методов, обеспечивших уровень развязки -46 дБ.

Электродинамический расчет проводился в программе CST Microwave Studio. По результатам моделирования был изготовлен опытный образец и проведены измерения.

Для дальнейшего повышения развязки между излучателями целесообразно рассмотрение применения DGS, EBG и HIS структур.

Список используемых источников

1. Fishler E., Haimovich A., Blum R. S., Chizhik D., Cimini L. J., Valenzuela R. A. MIMO Radar: An Idea Whose Time Has Come // Proceedings of the IEEE Radar Conference. 2004. PP. 71–78.
2. Wu T.-L., et al. Equivalent-Circuit and Numerical Analysis of a Compact EBG Structure for Ultra-Wideband Suppression // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2008. Vol. 50. № 3. P. 658–666.
3. Yang F., Rahmat-Samii Y. Electromagnetic Band Gap Structures in Antenna Engineering. Cambridge University Press, 2009. 292 p.
4. Sievenpiper, D. High-impedance electromagnetic surfaces with a forbidden frequency band / D. Sievenpiper, L. Zhang, R. J. Broas, N. G. Alexopolous, E. Yablonovitch // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 1999. Vol. 47. № 11. PP. 2059-2074. DOI: 10.1109/22.798001.
5. Лист широкополосного поглотителя СВЧ-энергии ЗИПСИЛ 601 РПМ-01 (СВЧ-поглотитель). URL: <https://www.rt-docs.ru/wp-content/uploads/2020/03/ЗИПСИЛ-601-РПМ-01-Листовой-СВЧ-поглотитель.pdf> (дата обращения: 12.05.2026).

ANALYSIS AND APPLICATION OF COMBINED METHODS FOR ENHANCING CHANNEL ISOLATION IN A MIMO RADAR ANTENNA ARRAY

Korovin K., Makarov V.

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

This work is devoted to methods for achieving high isolation between radiators in a 2×8 transceiver antenna array for a MIMO radar (Tx×Rx) 2x8. Various techniques for suppressing parasitic couplings are considered, including periodic electromagnetic structures and absorbers. A model in the CST Microwave Studio environment is presented, geometry optimization is performed, and measurement results of the prototype are provided. It is shown that the proposed solutions ensure isolation of at least -46 dB, which satisfies the minimum system requirements.

Key words: MIMO radar, digital antenna array, mutual coupling

УДК 629.73

ГРНТИ 47.49.33

РАСЧЕТ КОМПАКТНОЙ ПЕРЕКЛЮЧАЕМОЙ АНТЕННЫ СВЯЗИ ДЛЯ БПЛА

К. О. Коровин, А. Д. Уроков

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

При управлении беспилотным летательным аппаратом необходимо обеспечение устойчивой радиосвязи в различных летных условиях при изменяющейся ориентации летательного аппарата в полете и с ограниченной бортовой нагрузкой. В данной статье представлена разработка компактной антенной решетки на основе прямоугольных патч-антенн для диапазона 5.8 ГГц. Реализованная схема возбуждения излучающих элементов предполагает прием и передачу сигналов как линейной, так и круговой поляризации. Приведена полученная диаграмма направленности разработанной антенны, частотные характеристики, параметры эффективности.

БПЛА, патч-антенна, антенная решетка, диаграмма направленности

Современные беспилотные летательные аппараты (БПЛА) используются в широком диапазоне задач [1] – от военных до гражданских. В условиях интенсивной эксплуатации беспилотных систем приоритетное значение приобретает развитие аппаратуры передачи данных и обеспечение устойчивого радиоканала между наземными пунктами управления (НПУ) и воздушными судами. Необходимым условием функционирования канала связи является наличие антенной системы, обеспечивающей связь между НПУ и летательным аппаратом.

Антенные системы, устанавливаемые на борт БПЛА, должны быть компактными и обеспечивать стабильную связь с НПУ при любом положении дрона в пространстве.

В данной работе рассматривается моделирование компактной переключаемой антенной решетки, которая при должном управлении позволяет получить диаграмму направленности (ДН), приближенную к круговой.

В виде излучающих элементов решетки используются патч-антенны в силу их малых габаритов и широкой ДН. На рисунке 1 представлен схематичный вид излучающего элемента, а расчет производился по формулам 1-

4 [2] для частоты 5.8 ГГц, которая часто применяется в беспилотной технике, предполагающей возможность передачи видеосигналов [3].

$$W = \frac{1}{2 * f_0 * \sqrt{\mu_0 * \varepsilon_0}} * \sqrt{\frac{2}{\varepsilon_r + 1}} \quad (1)$$

$$L = \frac{1}{2 * f_0 * \sqrt{\varepsilon_{eff}} * \sqrt{\mu_0 * \varepsilon_0}} - 2 * \Delta L \quad (2)$$

$$W_g = W + 6 * h \quad (3)$$

$$L_g = L + 6 * h \quad (4)$$

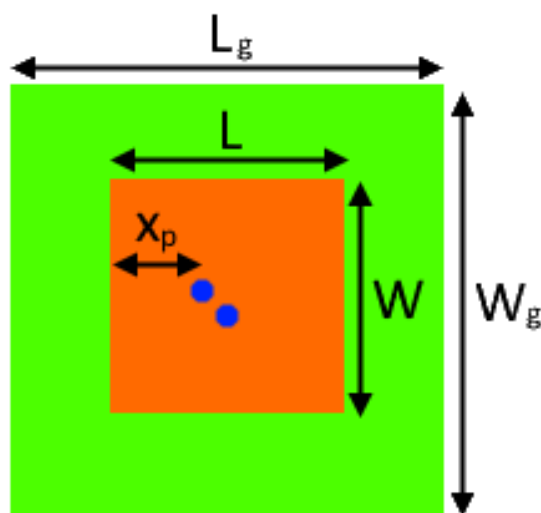


Рис. 1. Схематичное изображение патч-антенны

Питание излучающего элемента осуществляется двумя коаксиальными линиями, одна из которых обеспечивает вертикальную поляризацию, а другая – горизонтальную [4]. Одновременное запитывание обеих линий, при сдвиге одного из сигналов на 90° , позволяет добиться круговой поляризации. Использование коаксиальной фидерной линии вместо микрополосковой обосновано низкими потерями и более простым согласованием. Отсутствие микрополосковых схем согласования и деления также позволило добиться меньших размеров решетки. Расположение коаксиальных портов рассчитывалось по формулам 5-6. В таблицах 1-3 приведены значения параметров подложки, фидерной линии и самого излучателя после расчета и оптимизации.

$$Z_A = 90 \left(\frac{\varepsilon_r^2}{\varepsilon_r - 1} \right) \left(\frac{L}{W} \right)^2 \quad (5)$$

$$x_p = \frac{L}{\pi} \cos^{-1} \left(\sqrt{\frac{Z_p}{Z_A}} \right) \quad (6)$$

ТАБЛИЦА 1. Параметры патч-антенны

Параметр	f_0 , ГГц	W, мм	L, мм	Z_a , Ом	t, мкм
Значение	5.8	11.4	11.4	512	0.18

ТАБЛИЦА 2. Параметры подложки

Параметр	Материал	W_g , мм	L_g , мм	ϵ_r	h, мм
Значение	Стеклотекстолит FR-4	21	21	4.4	1.6

ТАБЛИЦА 3. Параметры коаксиального кабеля РК 50-1-12 и точки питания

Параметр	D, мм	d, мм	ϵ_r	Z_p , Ом	x_p , мм
Значение	1	0.32	2.25	50	3.2

На рисунке 2 представлена модель излучающего элемента в среде AnsysHFSS и его объемная диаграмма направленности. Коэффициент усиления (КУ) полученной антенны составляет 4.7дБ.

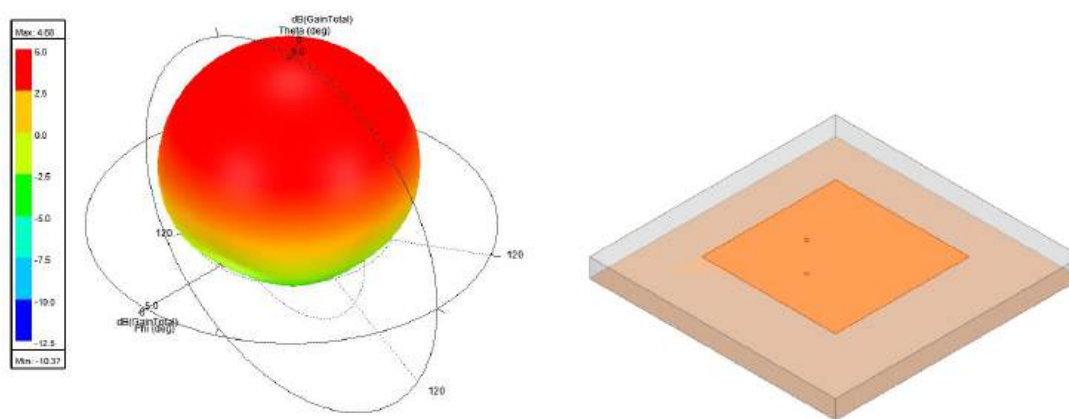


Рис. 2. Вид патч-антенны в среде AnsysHFSS и рассчитанная диаграмма направленности

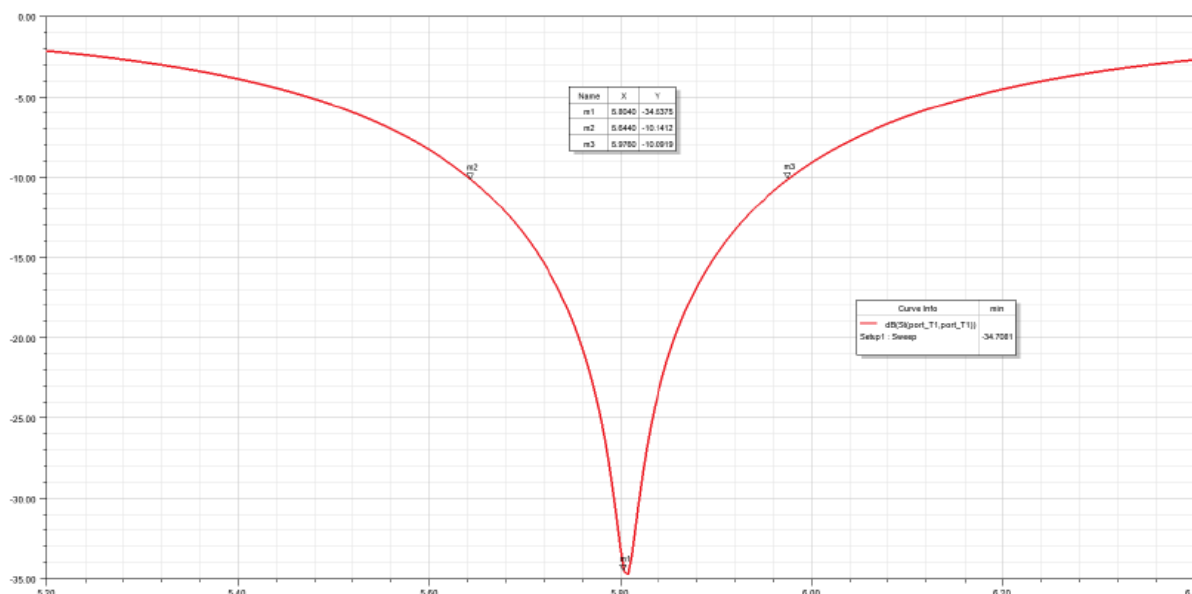


Рис. 3. График параметра S11 патч-антенны в среде AnsysHFSS

Как можно видеть на рисунке 3, на рабочей частоте 5.8ГГц параметр S11 принимает значение -34.5. Рабочая полоса излучающего элемента составляет 332МГц.

Благодаря тому, что ширина ДН излучающего элемента составляет 90° , достаточно покрывать 4 направления. Чтобы увеличить КУ и уменьшить ширину ДН по углу места в одном направлении, на каждой стороне решетки используется по 2 излучающих элемента [5] как представлено на рисунке 4. Расстояние D_{ar} между излучающими элементами одной стороны решетки подбиралось в значениях $0.5\lambda_0 - 1\lambda_0$. Наилучшие результаты были получены при значении $0.7\lambda_0$, что составляет 36мм.

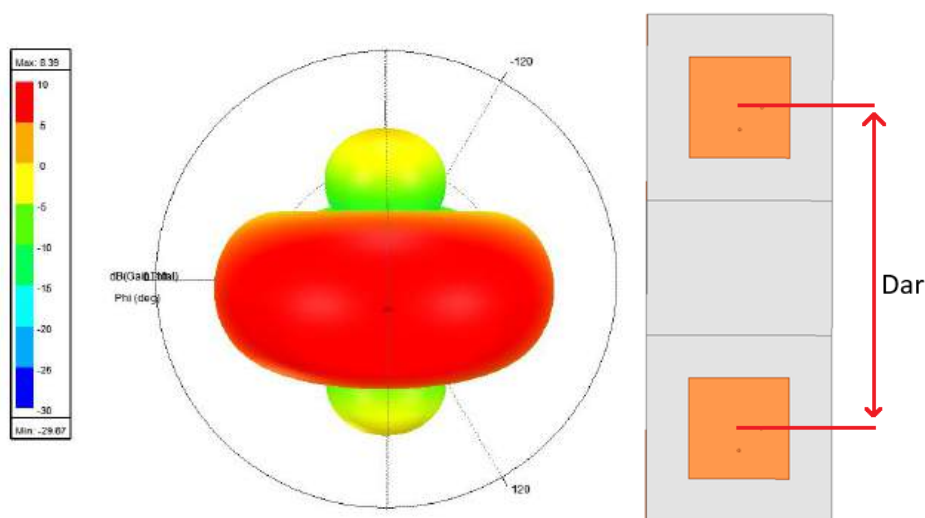


Рис. 4. Сторона антенной решетки и ее диаграмма направленности в среде AnsysHFSS

На рисунке 5 представлена рассчитанная антенная решетка, а в таблице 4 приведены ее параметры.

ТАБЛИЦА 4. Параметры антенной решетки

Параметр	W_s , мм	L_s , мм	G, дБ	$\Delta\theta_{el}$, град.	$\Delta\theta_{az}$, град.
Значение	62	24	7.8	80.2	36.2

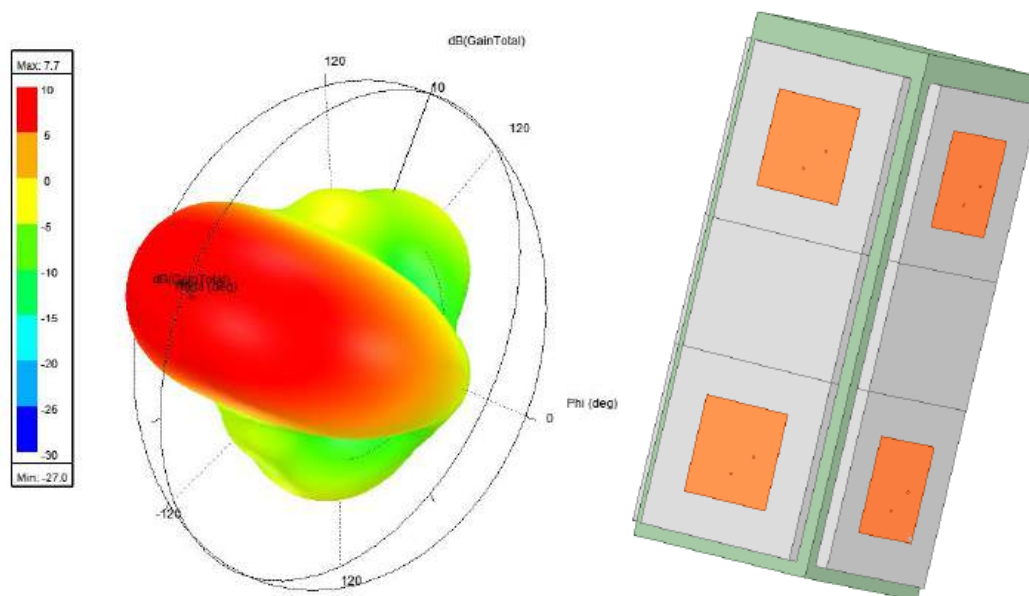


Рис. 5. Полученная антенная решетка и ее диаграмма направленности в среде AnsysHFSS

В качестве диаграммообразующей схемы (ДОС) предлагается схема, представленная на рисунке 6, обеспечивающая работу с вертикальной, горизонтальной и круговой поляризациями. В основе схемы лежат два переключателя SP4T, один из которых управляет питанием входов вертикальной поляризации, а другой – горизонтальной. Поскольку при излучении в одну сторону должны запитываться оба излучающих элемента, каждый выход этих переключателей проходит через делитель мощности. Для осуществления круговой поляризации используется 90-градусный гибридный ответвитель, на выходе которого сигнал разделяется на две части, одна из которых сдвинута на 90° , и подается на оба переключателя SP4T. Выбор требуемой поляризации осуществляется с помощью переключателя SP3T. Подобная схема может вносить значительные потери, поэтому более целесообразно может быть использование ДОС, предполагающих использование только линейной или круговой поляризации.

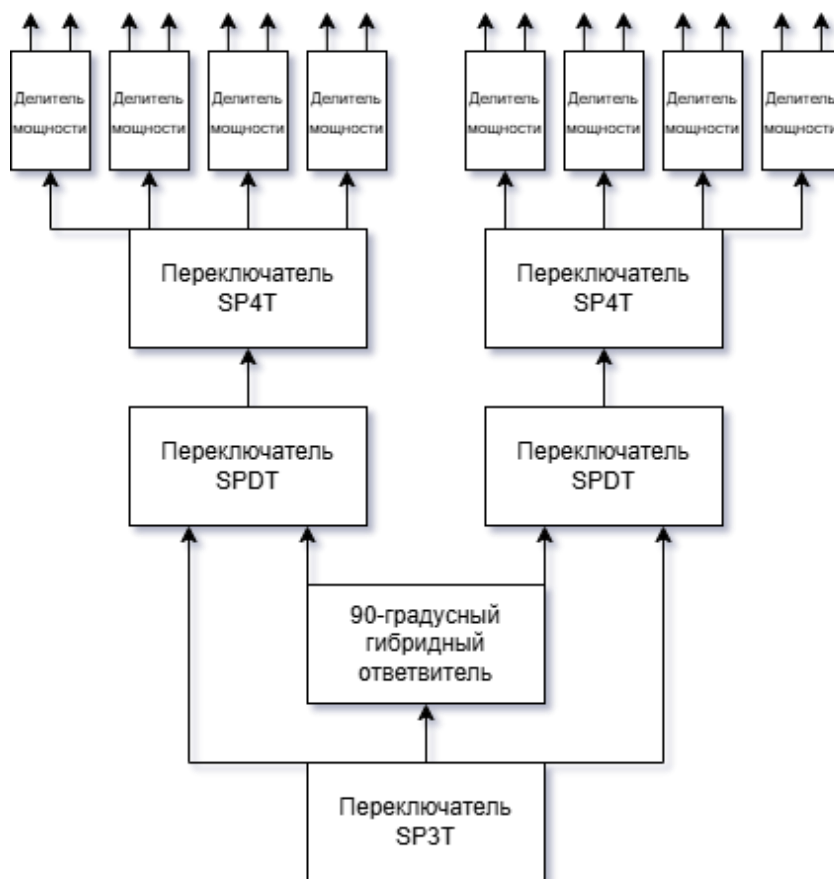


Рис. 6. Предложенная диаграммообразующая схема

Список используемых источников

1. Федосеева Н. А., Загвоздкин М. В. Перспективные области применения беспилотных летательных аппаратов // Научный журнал. 2017. N 9(22). С. 26–29. EDN: ZSUMLX.
2. Sharma S., Goodwill K, Dubey A, Dhakad R, Machavaram K. Designing of Patch Antenna: A Review // IJECT. 2024. Vol. 5, Iss. 2. PP. 133-137.
3. Бондарев А. Н., Киричек Р. В. Обзор беспилотных летательных аппаратов общего пользования и регулирования воздушного движения БПЛА в разных странах // Информационные технологии и телекоммуникации. 2016. Т. 4. N 4. С. 13–23. EDN: YLNEPH.
4. Hussain N., Tran H., Tran-Huy D. et al. A compact single layer dual-polarized antenna with wideband operation, high isolation, and high front-to-back ratio for 5G applications // Sci Rep. 2025. N 15. P. 25613.
5. Uddin U., Akaram W., Anasri M. R. Design and analysis of microstrip patch antenna and antenna array for vehicular communication system // 2018 Second International Conference on Inventive Communication and Computational Technologies (ICICCT). 2018. PP. 1746-1751. IEEE.

DESIGN OF A COMPACT SWITCHABLE COMMUNICATION ANTENNA FOR UAVS

Korovin K., Urokov A.

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

When controlling an unmanned aerial vehicle, it is necessary to ensure stable radio communication under various flight conditions with changing orientation of the aircraft in flight and limited onboard payload. This paper presents the development of a compact antenna array based on rectangular patch antennas for the 5.8 GHz band. The implemented excitation scheme of the radiating elements allows for receiving and transmitting signals of both linear and circular polarization. The obtained radiation pattern of the developed antenna, frequency characteristics, and efficiency parameters are presented.

Key words: UAVs, patch antenna, antenna array, radiation pattern

УДК 004.891
ГРНТИ 28.23.29

РАЗРАБОТКА ДИСТАНЦИОННОГО МОНИТОРИНГА ЗДОРОВЬЯ ПАЦИЕНТА С МОДУЛЕМ ПРЕДИКТИВНОЙ АНАЛИТИКИ

М. Ю. Кужлев, В. С. Усс

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В работе рассматривается задача – разработка интеллектуальной системы дистанционного мониторинга здоровья пациента с модулем искусственного интеллекта. Система позволяет перейти от реактивного к проактивному подходу для прогнозирования критических состояний до их проявления. Разработана концепция автоматизированного управления технологическим процессом с предиктивным модулем. Спроектирована система, описаны взаимодействия модулей и создан программный прототип системы, выдающий персонализированные прогнозы с объяснением. Система соответствует требованиям безопасности РФ, что позволяет интегрировать в единую медицинскую информационную систему.

предиктивная аналитика, автоматизированная система управления технологическим процессом, дистанционный мониторинг здоровья, гибридные модели машинного обучения, персонализация, информационная безопасность

По данным Всемирной организации здравоохранения, хронические неинфекционные заболевания являются причиной более 70 % всех смертей в мире, значительная часть которых может быть предотвращена при своевременном выявлении предвестников ухудшения состояния [1]. В этих условиях особую важность приобретает создание интеллектуальных АСУТП, способных в реальном времени анализировать многомерные потоки биомедицинских данных и формировать обоснованные прогнозы развития критических состояний [2], включающих в себя простых и интуитивно понятных web-кабинетов, для отслеживания характеристик состояний [3].

В рамках настоящего исследования разработана архитектура распределенной информационной системы дистанционного мониторинга здоровья пациентов, представляющая собой многоуровневую клиент-серверную платформу с выделенным модулем предиктивной аналитики. Система обеспечивает непрерывный сбор, передачу и обработку многомерных биомедицинских данных в реальном времени, включая физиологические параметры, лабораторные показатели и субъективные данные пациента [4]. Центральным элементом платформы является гибридный модуль предиктивной аналитики, реализующий предложенную модель на основе LSTM, XGBoost и механизма Elastic Weight Consolidation, который позволяет своевременно

выявлять предвестники ухудшения состояния и формировать персонализированные риски развития критических событий. Такая архитектура обеспечивает высокую масштабируемость, отказоустойчивость и возможность интеграции с существующими медицинскими информационными системами, создавая основу для перехода от реактивной к проактивной модели здравоохранения в части дистанционного мониторинга здоровья пациента.

Для размещения прогностической модели были выбраны сервера медицинской организации. Это решение обеспечивает оптимальный баланс между доступными вычислительными ресурсами, приемлемой задержкой обработки данных (180–320 мс), бесшовной интеграцией с существующими медицинскими информационными системами и электронными медицинскими картами, а также полным соответствием требованиям информационной безопасности Российской Федерации, применяемым к значимым объектам критической информационной инфраструктуры [5].

Концептуальная схема системы представлена на рис. 1.

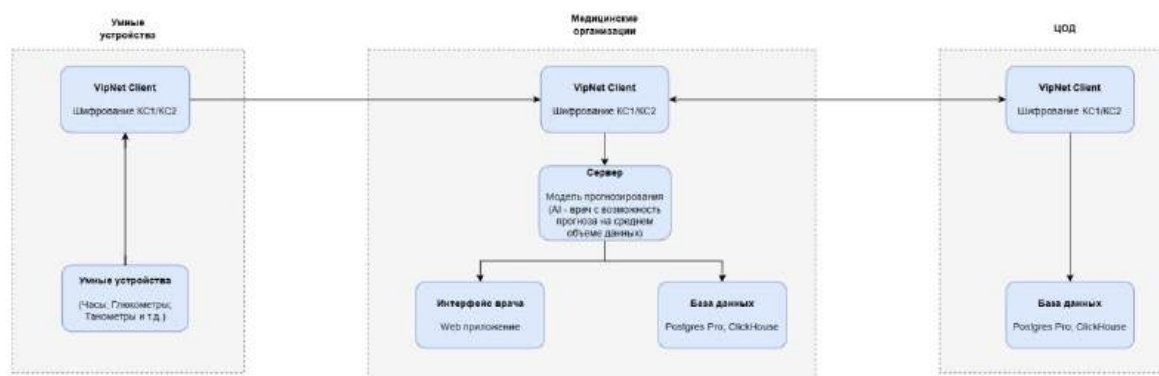


Рис. 1. Концептуальная модель работы АСУТП дистанционного мониторинга здоровья пациента

Рассматривая модуль предиктивной аналитики более детально, следует акцентировать внимание на выбранной архитектуре гибридной предиктивной модели. Для решения задачи использован стек из трех ключевых компонентов: двух последовательных блоков Long Short-Term Memory [6] и модели eXtreme Gradient Boosting [7], усиленной механизмом Elastic Weight Consolidation [8].

Алгоритм работы модели организован следующим образом. На вход системы поступают многомерные данные от пациента. Первый блок LSTM выполняет выявление скрытых временных закономерностей в последовательных данных. Второй блок LSTM формирует компактные эмбединги, отражающие наиболее значимые паттерны динамики состояния пациента. Полученные эмбединги объединяются с дополнительными параметрами,

закрепленными посредством механизма Elastic Weight Consolidation (EWC), что позволяет модели сохранять ранее приобретенные знания и эффективно бороться с катастрофическим забыванием при работе с новыми данными. Для обогащения признакового пространства используется информация из базы данных.

Далее объединенный вектор признаков поступает на два параллельных блока XGBoost. Первый блок отвечает за формирование объяснения прогноза (explainability), второй – за непосредственную классификацию уровня риска развития критического состояния. Результаты работы модели в виде прогноза риска и его интерпретации передаются лечащему врачу, завершая цикл работы модуля предиктивной аналитики.

Алгоритм работы предиктивного модуля представлен на рис. 2.

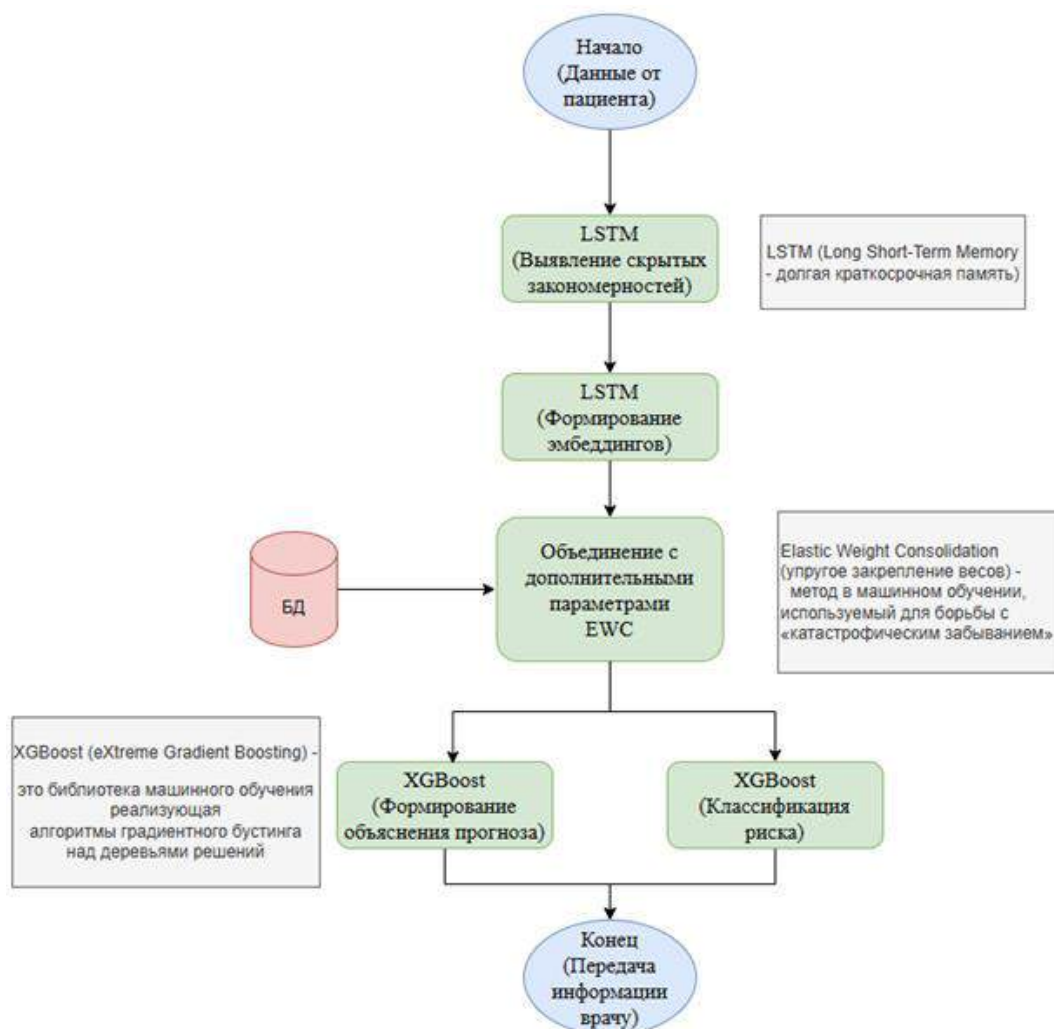


Рис. 2. Алгоритм работы модуля предиктивной аналитики АСУТП дистанционного мониторинга здоровья пациента

Для экспериментов сформирован синтетический датасет, имитирующий реальные условия: 500 пациентов, 30 дней, 120 измерений в час (каждые 30 с), всего 2 592 000 записей. Признаками состояния здоровья пациента выступают многомерные временные ряды, состоящие из частоты сердечных сокращений, сатурации крови, артериального давления, глюкозы, шагов, калорий, ночных пробуждений, а также дополняются клиническими данными о его болезнях и принимаемых лекарствах.

Обучение проводилось в два этапа:

- 1) базовая модель на 80/20 деление на популяционные паттерны;
- 2) дообучение с EWC на последних 7–14 днях каждого пациента из тестовой выборки.

Результаты предсказания заболеваний до дообучения на персональных данных и после представлены в таблице 1 и в таблице 2.

ТАБЛИЦА 1. Результаты оценки базовой модели на валидационной выборке до персонализации

Диагноз	Точность	Чувствительность	AUC-ROC	F1-score
Инфаркт миокарда	84,7 %	81,2 %	0,891	0,827
Инсульт	82,9 %	78,6 %	0,874	0,803
Декомпенсация СД 2 типа	79,4 %	76,3 %	0,852	0,775
Тяжелая гипогликемия	81,6 %	77,9 %	0,863	0,794
Жизнеугрожающие аритмии	85,2 %	82,4 %	0,897	0,838

После персонализированного дообучения с использованием EWC были получены существенно более точные индивидуальные прогнозы. Результаты персонализированной модели для ключевых заболеваний.

ТАБЛИЦА 2. Результаты оценки базовой модели на валидационной выборке после персонализации

Диагноз	Точность	Чувствительность	AUC-ROC	F1-score
Инфаркт миокарда	91,3 %	88,7 %	0,942	0,899
Инсульт	89,6 %	86,4 %	0,931	0,877
Декомпенсация СД 2 типа	87,8 %	85,1 %	0,918	0,862
Тяжелая гипогликемия	90,2 %	87,5 %	0,935	0,884
Жизнеугрожающие аритмии	92,1 %	89,3 %	0,951	0,907

Разбор отдельных клинических ситуаций показал, что учет индивидуальных особенностей пациента меняет картину прогноза. У больного 67 лет, страдающего хронической сердечной недостаточностью и ведущего малоподвижный образ жизни, вероятность инфаркта миокарда, по расчетам модели, поднялась с 71 до 87 %, а угроза декомпенсации сахарного диабета с 58 до 82 %. Иная динамика наблюдалась у молодого пациента с нормальной массой тела, сохраняющего физическую активность и стабильно принимающего бета-блокаторы: расчетная опасность критических состояний снизилась.

Эксперимент показал состоятельность предложенной гибридной схемы. Индивидуальная донастройка модели, опирающаяся на механизм EWC, улучшила прогнозы в среднем на 10 процентных пунктов по ключевым метрикам. При этом модель не растеряла общих медицинских закономерностей и подстроилась под нормы отдельного человека. Выводы получены на синтетических данных, проверка модуля предиктивной аналитики на прогнозах для реальных пациентов остается задачей дальнейших исследований.

Список используемых источников

1. Rajkomar A., Dean J., Kohane I. Machine Learning in Medicine // New England Journal of Medicine. 2019. Vol. 380. N 14. PP. 1347–1358.
2. Дюк В., Ближас А. Телемедицина. СПб.: Litres, 2020. 144 с.
3. Максимов Д. Е., Мишкина А. И., Карась С. И., Финченко Е. А. Персонализированные медицинские web-сервисы в системе здравоохранения Российской Федерации // Бюллетень сибирской медицины, 2014. Т. 13. № 5. С.130-137.
4. Владзимирский А. Телемедицина. Как использовать цифровой прогресс для здоровья, когда все на удаленке. СПб.: Эксмо, 2019. 300 с.
5. Требования к обеспечению безопасности значимых объектов критической информационной инфраструктуры Российской Федерации (утв. приказом ФСТЭК России от 25.12.2017 № 235) // Сборник нормативных правовых актов в области защиты информации. М.: ФСТЭК России, 2024. 128 с.
6. Hochreiter S., Schmidhuber J. Long short-term memory // Neural Computation. 1997. Vol. 9. № 8.
7. Chen T., Guestrin C. XGBoost: A scalable tree boosting system // KDD. 2016.
8. Kirkpatrick J. et al. Overcoming catastrophic forgetting in neural networks // PNAS. 2017. Vol. 114. № 13. (EWC)

**DEVELOPMENT OF REMOTE PATIENT HEALTH MONITORING
WITH A PREDICTIVE ANALYTICS MODULE**

Kuzhlev M., Uss V.

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

Development of an intelligent patient healthcare system with an artificial intelligence module. The system enables a transition from a reactive to a proactive approach for predicting the stages of their manifestation. A concept for controlled management of technological processes with a predictive module has been developed. A system describing the interaction of modules has been designed, and a software prototype has been created that generates personalized forecasts with explanations. The system complies with Russian Federation safety requirements, allowing for integration into a unified information system.

Key words: *intelligent data analysis, predictive analytics, automated process control system, remote health monitoring, forecasting algorithms, automation*

УДК 004.738.43

ГРНТИ 50.43.33

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ СЛУЖЕБНОГО ТРАФИКА НА СВОЕВРЕМЕННОСТЬ ДОСТАВКИ СООБЩЕНИЙ В СЕТИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ С ПРИМЕНЕНИЕМ РЕТРАНСЛЯТОРОВ НА БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТАХ

З. В. Курашев¹, Е. В. Лиманцева², А. М. Чуднов²

¹ФГБУ 16 ЦНИИИ Министерства обороны Российской Федерации

²Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного

Сети передачи данных с применением ретрансляторов на беспилотных летательных аппаратах являются перспективным направлением развития телекоммуникационных систем благодаря возможности быстрого развертывания, обеспечения связи в труднодоступных районах и поддержания функционирования телекоммуникационной инфраструктуры в условиях динамически изменяемой топологии сети. Однако высокая мобильность БПЛА приводит к увеличению объема служебного трафика, связанного с поддержанием актуальной маршрутизации и обменом управляющими сообщениями. Рост интенсивности служебного трафика оказывает существенное влияние на своевременность передачи сообщений в сети передачи данных. В статье предложена математическая модель оценки влияния служебного трафика на вероятностно-временные характеристики сети передачи данных с применением ретрансляторов на беспилотных летательных аппаратах. Выполнен расчет интенсивностей потоков, средних задержек передачи и вероятности своевременной доставки пакетов с использованием аппарата теории массового обслуживания и гамма-распределения. Полученные результаты позволяют оценить влияние служебной нагрузки на функционирование сети и определить оптимальный набор таблиц маршрутизации, обеспечивающий снижение нагрузки, создаваемой служебным трафиком, и повышение своевременности доставки сообщений.

сеть передачи данных, одноранговая сеть, ретранслятор, беспилотный летательный аппарат, маршрутизация, вероятностно-временные характеристики, интенсивность трафика, служебный трафик, своевременность, функция распределения вероятности

Введение

Развитие беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и технологий беспроводной связи способствует активному применению БПЛА в качестве ретрансляторов при организации мобильных сетей передачи данных. Использование БПЛА-ретрансляторов позволяет оперативно разворачивать

телекоммуникационную инфраструктуру в районах отсутствия стационарных средств связи.

Одной из существенных особенностей сетей передачи данных с ретрансляторами на БПЛА является необходимость постоянного обмена служебной информацией между узлами сети. К служебному трафику относятся сообщения мониторинга состояния сети, данные о соседних узлах, информация о доступности каналов связи, обновления таблиц маршрутизации, сигнальные сообщения протоколов маршрутизации и управления сетью. Из-за высокой мобильности узлов и частого изменения топологии сети возрастает интенсивность служебного трафика, который может занимать значительную долю пропускной способности каналов связи [1, 2, 3].

Большое количество служебного трафика оказывает влияние на вероятностно-временные характеристики сети передачи данных, что приводит к увеличению времени задержки пакетов и снижению вероятности своевременной доставки сообщений. Это особенно критично в сетях с ограниченными ресурсами пропускной способности и в условиях интенсивного информационного обмена.

Существующие подходы к управлению маршрутизацией в сети передачи данных с применением ретрансляторов на беспилотных летательных аппаратах направлены на обеспечение связности сети и формирование таблиц маршрутизации, однако в недостаточной степени учитывают влияние служебного трафика на своевременность доставки сообщений. Применяемые протоколы маршрутизации, такие как OLSR и DSR [4, 5], формируют большой объем служебной информации при масштабировании, что приводит к ухудшению качества функционирования сети в целом [6, 7].

В связи с этим актуальной является задача оценки влияния интенсивности служебного трафика на своевременность доставки сообщений в сети передачи данных с применением ретрансляторов на БПЛА, а также определения условий, при которых обеспечивается требуемая вероятность своевременной доставки сообщений. Решение данной задачи позволяет обосновать требования к организации мониторинга состояния сети, алгоритмам управления маршрутизацией и методам снижения объема служебного трафика.

В статье рассматривается модель сети передачи данных с применением ретрансляторов на БПЛА, которая учитывает информационный и служебный трафик. Оценивается влияние интенсивности служебного трафика на вероятность своевременной доставки сообщений. Используются вероят-

ностно-временные характеристики сети и методы теории массового обслуживания. Полученные результаты позволяют оценить зависимость вероятности своевременной доставки сообщений от коэффициента служебной нагрузки для исходной и редуцированной сети.

Модель СПД

На рисунке 1 представлен вариант структурной схемы взаимодействия объектов в СПД с применением ретрансляторов на БПЛА. Узлы сети выполняют функции приема, передачи и маршрутизации пакетов.

Топология сети представляется ориентированным графом [8]:

$$G = (V, E),$$

где V – множество узлов сети;

E – множество допустимых линий связи между узлами.

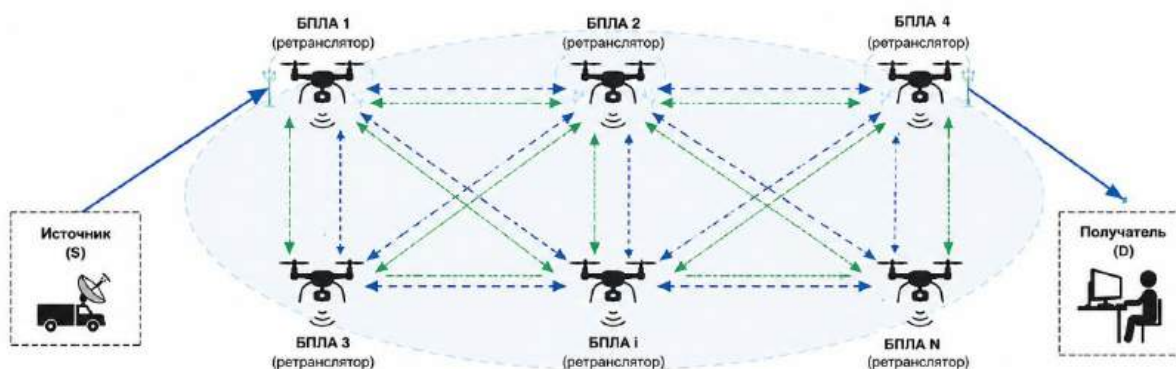


Рис. 1. Вариант структурной схемы взаимодействия объектов в СПД с применением ретрансляторов на БПЛА

Для снижения вычислительной сложности управления маршрутизацией и уменьшения объема служебного трафика в работе применяется редукция множества рассматриваемых маршрутов. Из полного множества потенциально допустимых маршрутов выделяется подмножество маршрутов, удовлетворяющих ограничениям по связности сети и пропускной способности линий связи. Это позволяет сократить объем маршрутной информации, циркулирующей в сети, и уменьшить интенсивность служебного обмена.

В качестве исходных данных модели используются:

матрица допустимых пропускных способностей линий связи [8]:

$$C = (c_{k,l}),$$

где $c_{k,l}$ – пропускная способность линии связи между узлами k и l (пакет/с);

матрица интенсивностей информационных потоков (матрица тяготения) [9, 10]:

$$\Lambda = (\lambda_{i,j}),$$

где $\lambda_{i,j}$ – интенсивность потока данных, передаваемого от узла i к узлу j .

Суммарная интенсивность потока включает как пользовательский, так и служебный трафик:

$$\lambda_{i,j} = \lambda_{i,j}^{inf} + \lambda_{i,j}^{srv},$$

где $\lambda_{i,j}^{inf}$ – интенсивность пользовательского трафика;

$\lambda_{i,j}^{srv}$ – интенсивность служебного трафика.

Служебный трафик формируется:

- сообщениями, необходимыми для актуализации матрицы допустимых связей и далее таблиц маршрутизации;
- служебными сообщениями обмена маршрутной информацией.

Интенсивность служебного трафика задается пропорционально пользовательскому трафику:

$$\lambda_{i,j}^{srv} = \alpha \lambda_{i,j}^{inf},$$

где α – коэффициент служебной нагрузки.

Тогда суммарная интенсивность потока определяется выражением

$$\lambda_{i,j} = \lambda_{i,j}^{inf} (1 + \alpha).$$

В задаче синтеза алгоритма маршрутизации параметры сети позволяют определить актуальный набор таблиц маршрутизации пакетов [11]:

$$\mathcal{P} = \langle P^k \rangle_{k \in \mathbb{N}_n}$$

где $P^k = (p_{l,j}^k)$ – вероятность направления пакета адресованного j -узлу на l -порт.

Целью управления маршрутизацией является определение набора таблиц маршрутизации, обеспечивающего максимальную вероятность своевременной доставки сообщений:

$$Pr\{T \leq T^*\} \rightarrow \max_p,$$

где T – случайное время задержки передачи пакета в сети;

T^* – максимально допустимое время доставки сообщения.

Общие принципы оценки влияния служебного трафика

Оценка влияния служебного трафика на своевременность доставки сообщений выполняется на основе анализа вероятностно-временных характеристик сети передачи данных.

На первом этапе по матрице тяготения и таблицам маршрутизации определяются множество маршрутов по формулам (1), (2) и (3) из [12] и интенсивности потоков в информационных направлениях, линиях связи и узлах сети по формулам (5) (6) и (10) из [12]. При этом учитывается как пользовательский, так и служебный трафик.

На втором этапе рассчитываются показатели задержки передачи сообщений на линиях связи, маршрутах, информационных направлениях и в сети в целом. Средняя задержка определяется как математическое ожидание времени доставки сообщений, а дисперсия характеризует степень отклонения времени доставки от его среднего значения.

Для (l, k) – направления связи:

$$\tau_{l,k} = \frac{1}{c_{l,k}} \quad (1)$$

для k -узла (среднее время передачи, среднее время задержки и дисперсия времени задержки):

$$\tau_k = \frac{1}{\lambda_{\Sigma k}} \sum_l \lambda_{lk} \tau_{l,k} \quad (2)$$

$$T_k = \frac{\tau_k}{1 - \tau_k \lambda_{\Sigma k}} \quad (3)$$

$$D_k = M(T^2) - [M(T)]^2 \quad (4)$$

для μ -маршрута:

$$T_\mu = \sum_{k \in \mu} T_k \quad (5)$$

$$D_\mu = \sum_{k \in \mu} D_k \quad (6)$$

для информационного $\langle i, j \rangle$ -направления:

$$T_{\langle i, j \rangle} = \sum_{\mu \in \langle i, j \rangle} P_{\mu | \langle i, j \rangle} T_\mu \quad (7)$$

$$D_{\langle i, j \rangle} = \sum_{\mu \in \langle i, j \rangle} P_{\mu | \langle i, j \rangle} D_\mu \quad (8)$$

для СПД в целом:

$$T_\Delta = \sum_{i,j} P_{\langle i, j \rangle} T_{\langle i, j \rangle} \quad (9)$$

$$D_\Delta = \sum_{i,j} P_{\langle i, j \rangle} D_{\langle i, j \rangle} \quad (10)$$

Для описания случайного характера времени доставки используется гамма-распределение, параметры которого определяются по рассчитанным значениям среднего времени задержки и дисперсии.

Функция распределения времени задержки:

$$F_y(t) = F_G(t | T_y, D_y) \quad (11)$$

На заключительном этапе вычисляется вероятность своевременной доставки сообщений как вероятность того, что время доставки не превышает допустимого значения T^* . Полученная вероятность используется в качестве основного показателя эффективности функционирования сети передачи данных:

$$Pr\{t \leq T^*\} = F_G(T^*) = G(T^* | T_\Delta, D_\Delta) \quad (12)$$

Изменяя коэффициент служебной нагрузки α , можно оценить влияние объема служебного трафика на задержки передачи и вероятность своевременной доставки сообщений.

Для оценки влияния служебного трафика на своевременность доставки сообщений выполнен расчет для двух вариантов организации маршрутизации:

- а) исходная сеть, в которой используется полное множество допустимых маршрутов;
- б) сеть с редукцией множества маршрутов.

В качестве параметра исследования использовался коэффициент служебной нагрузки α , определяющий долю служебного трафика относительно пользовательского. Для каждого значения α рассчитывалась вероятность своевременной доставки сообщений.

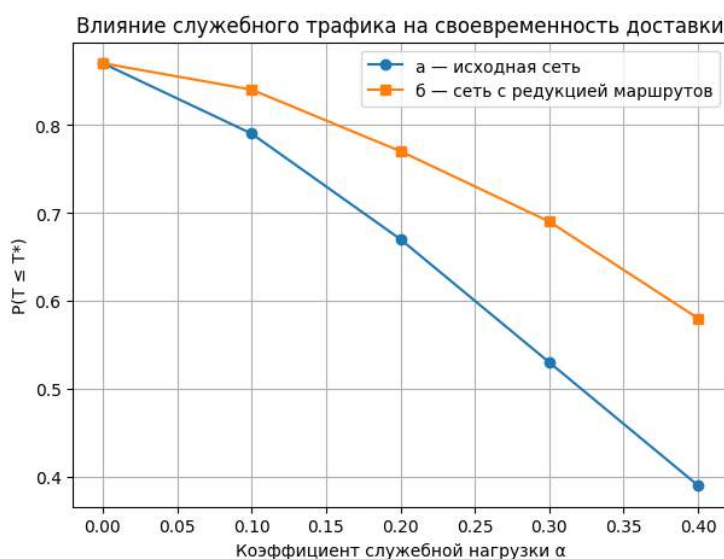


Рис. 2. Зависимость вероятности своевременной доставки сообщений от коэффициента служебной нагрузки: а – исходная сеть; б – сеть с редукцией множества маршрутов.

На рисунке 2 показана зависимость вероятности своевременной доставки сообщений от коэффициента служебной нагрузки для исходной и редуцированной сети. Установлено, что увеличение интенсивности служебного трафика приводит к снижению вероятности своевременной доставки сообщений вследствие роста нагрузки на линии связи и узлы сети. В редуцированной сети уменьшается объем служебной информации, циркулирующей в сети, что приводит к снижению интенсивности служебного обмена и улучшению вероятностно-временных характеристик.

При значениях коэффициента служебной нагрузки $\alpha = 0.3 \dots 0.4$ преимущество редуцированной сети становится наиболее заметным. Вероятность своевременной доставки сообщений возрастает на 15–20 % по сравнению с вариантом использования полного множества маршрутов.

Заключение

Полученные результаты подтверждают целесообразность применения методов редукции маршрутов при управлении маршрутизацией в сетях передачи данных с ретрансляторами на БПЛА и могут быть использованы при разработке алгоритмов адаптивного управления маршрутизацией, ориентированных на повышение своевременности доставки сообщений в условиях динамически изменяемой топологии сети.

Список используемых источников

1. Bekmezci I., Sahingoz O.K., Temel Ş. Flying Ad-Hoc Networks (FANETs): A Survey // Ad Hoc Networks. 2013. Vol. 11. N 3. P. 1254–1270.
2. Akyildiz I.F., Wang X. Wireless Mesh Networks. Chichester: Wiley, 2009. 324 p.
3. Biradar R. Inter-Intra Cluster Multihop-LEACH Routing In Self-Organizing Wireless Sensor Networks / R. Biradar, S. R. Sawant, R. Mudholkar, V. C. Patil // International Journal of Research and Reviews in Computer Science (IJRRCS). 2011. March. V. 2, № 1. P. 124-130.
4. Clausen T., Jacquet P. Optimized Link State Routing Protocol (OLSR). RFC 3626. IETF, 2003.
5. Johnson D. B., Maltz D. A., Hu Y. C. The Dynamic Source Routing Protocol (DSR) for Mobile Ad Hoc Networks. RFC 4728. IETF, 2007.
6. Manjeshwar A. TEEN: A Routing Protocol for Enhanced Efficiency in Wireless Sensor Networks / A. Manjeshwar, D. P. Agarwal // Proceedings of the 15th International Symposium on Parallel and Distributed Processing. 2001. April. P. 20092015.
7. Roychowdhury S. Geographic Adaptive Fidelity and Geographic Energy Aware Routing in Ad Hoc Routing / S. Roychowdhury, C. Patra // International Journal of Computer and Communication Technology (IJCCT) for International Conference on Advances in Computer, Communication Technology and Applications (ACCTA-2010) (August 2010). 2010. V. 1. № 2-4. P. 309-313.

8. Чуднов А. М., Курашев З. В. Принципы формирования маршрутных таблиц на основе оптимизации распределения потоков в сети передачи данных // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2017. Т. 9. № 6. С. 46-51.

9. Чуднов А. М., Положинцев Б. И., Кичко Я. В. Анализ помехозащищенности обмена данными группы беспилотных летательных аппаратов в условиях оптимизированных помех // Радиотехника. 2022. Т. 86. № 12. С. 33–46. DOI: 10.18127/j00338486-202212-03.

10. Деркач А. Е., Лиманцева Е. В., Чуднов А. М. Принципы повышения устойчивости сети обмена данными большой группы БПЛА на основе кластеризации ее структуры // Телекоммуникации и связь. 2026. № 1(10). С. 2-7.

11. Чуднов А. М., Путилин А. Н., Попов А. И. Комплексное управление маршрутизацией пакетов и режимами работы радиосредств в неоднородной сети передачи данных // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2019. № 1(33). С. 46–56.

12. Чуднов А. М., Губская О. А., Кичко Я. В. Методика анализа вероятностно-временных характеристик обмена сообщениями в комплексе беспилотных летательных аппаратов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 11. С. 117–124.

EVALUATION OF THE IMPACT OF SERVICE TRAFFIC INTENSITY ON THE TIMELINESS OF MESSAGE DELIVERY IN A DATA TRANSMISSION NETWORK USING RELAYS ON UNMANNED AERIAL VEHICLES

Kurashev Z.¹, Limantseva E.², Chudnov A.²

¹Federal State Budgetary Institution "16th Central Research Institute" of the Ministry of Defence of the Russian Federation

²Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S. M. Budyonny

Data transmission networks using relays on unmanned aerial vehicles are a promising direction for the development of telecommunication systems due to the ability to quickly deploy, provide communication in hard-to-reach areas, and maintain the functioning of telecommunication infrastructure under dynamically changing network topology. However, the high mobility of UAVs leads to an increase in the volume of service traffic associated with maintaining up-to-date routing and exchanging control messages. An increase in service traffic intensity significantly affects the timeliness of message transmission in the data network. This paper proposes a mathematical model for assessing the impact of service traffic on the probabilistic-temporal characteristics of a data transmission network using relays on unmanned aerial vehicles. Calculations of flow intensities, average transmission delays, and the probability of timely packet delivery are performed using queuing theory and gamma distribution. The obtained results make it possible to assess the impact of service load on network functioning and determine an optimal set of routing tables that reduces the load generated by service traffic and improves the timeliness of message delivery.

Key words: data transmission network, peer-to-peer network, relay, unmanned aerial vehicle, routing, probabilistic-temporal characteristics, traffic intensity, service traffic, timeliness, probability distribution function

УДК 658.5
ГРНТИ 06.81.19

К ВОПРОСУ РАЗРАБОТКИ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВАМИ

А. Г. Любимов, В. В. Уласик

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В условиях цифровизации промышленности автоматизация управленческих и производственных процессов становится критически важной. Одним из эффективных инструментов оптимизации работы промышленных предприятий являются информационные системы управления производственными процессами (Manufacturing Execution System), обеспечивающие оперативный контроль и управление производственными процессами в режиме реального времени. В работе приведены основные проблемы внедрения отечественных и зарубежных систем. Предлагается разработку информационных систем управления производственными процессами на предприятии реализовать поэтапно на основе процессного подхода с учетом степени взаимосвязи разрабатываемых функциональных модулей с действующими на предприятии системами управления.

управление производством, информационные системы управления производственными процессами, процессный подход

Современное промышленное производство характеризуется ростом объемов выпускаемой продукции, усложнением технологических цепочек и повышением требований к качеству и срокам выполнения заказов. В этих условиях автоматизация управленческих и производственных процессов позволяет снизить временные и материальные затраты, повысить эффективность работы персонала и минимизировать влияние человеческого фактора. В настоящее время автоматизация управления производством эффективно реализуется на основе использования MES-систем.

MES (Manufacturing Execution System) – это информационная система управления производственными процессами в реальном времени, обеспечивающая оперативное планирование, диспетчеризацию и контроль выполнения производственных заданий. В рамках концепции комплексной автоматизации промышленных предприятий MES-системы должны обеспечить взаимосвязь стратегического уровня планирования и управления предприятием (ERP-системы) с технологическим уровнем автоматизированного управления технологическими процессами (SCADA, АСУ ТП). На рынке промышленной автоматизации имеется достаточно много зарубежных и отечественных разработок MES-систем.

Разработка MES-системы для предприятия является дорогостоящим проектом, поэтому крупные предприятия, как правило, отдают предпочтение готовым программным продуктам с последующей адаптацией их к ре-

альному производству. Предприятия, использующие зарубежные программные продукты, сталкиваются с рядом проблем организационного характера (например, продление лицензий в условиях санкционного давления). В настоящее время лишь примерно 20-30 % российских промышленных предприятий используют отечественные MES-системы, применяемые на стыке ERP и АСУ ТП [1].

Реализация и адаптация MES-системы для конкретного производства обусловлена своими особенностями и технической реализацией тех или иных функций. Для того чтобы система не стала неэффективной и дорогостоящей компьютерной программой, а приносила реальную управленческую и финансовую пользу, специалисты отмечают следующие проблемы [1, 2]:

- наличие проблемных мест на производстве (например, наличие устаревшего технологического оборудования и средств автоматизации);
- недооценка сложности внедрения программного обеспечения;
- структурно-технологический характер производства (часто кардинальная смена номенклатуры выпускаемой продукции);
- недостаточность жестко структурированной нормативно-справочной информации (номенклатурных справочников изделий, спецификаций, детальных маршрутных карт и т.д.);
- наличие действующих систем управления предприятием иностранных и отечественных производителей (особенно при сопряжении ERP с SCADA и АСУ ТП);
- разработчик не всегда в состоянии обеспечить системе необходимый уровень поддержки и развития;
- системы, разработанные под конкретное производство, не получают широкого признания другими заказчиками.

Перечень проблем, имеющих место при выборе готовых решений или возникающих при разработке MES-системы для конкретного производства можно продолжать. Вместе с тем, эффективность применения такого рода систем автоматизации производства трудно переоценить.

Анализ предлагаемых на рынке промышленной автоматизации отечественных решений MES-систем свидетельствует [2,3], что в основу разработки положен модульный принцип. Такой подход допускает поэтапное внедрение программных продуктов, минимизировать первоначальные затраты и последовательно решать задачи повышения эффективности производства. В качестве базовых в MES-системе, как правило, предлагаются к реализации следующие основные функциональные модули (таблица 1).

ТАБЛИЦА 1. Основные функции модулей MES-системы

Модуль	Основные функции
Управление производственными заказами	Прием и распределение заказов, отслеживание статусов, контроль выполнения
Диспетчеризация и планирование	Планирование загрузки оборудования и персонала, корректировка расписаний
Управление технологическими процессами	Контроль выполнения операций, соблюдение маршрутных карт, фиксация отклонений
Контроль качества продукции	Регистрация проверок и испытаний, учет брака, формирование заключений
Управление материальными потоками	Учет движения материалов и готовой продукции, контроль складских операций
Управление оборудованием	Мониторинг состояния оборудования, учет простоев, анализ эффективности
Формирование отчетности и аналитики	Сбор данных от всех модулей, отчеты KPI, поддержка управленческих решений

В свою очередь, каждый из представленных в таблице функциональных модулей включает, в общем случае, целый ряд взаимосвязанных процессов.

В соответствии с современными тенденциями применения *процессного подхода* к управлению производством, функциональную структуру MES-системы целесообразно рассматривать в рамках предлагаемой парадигмы. При таком подходе все процессы управления производством можно рассматривать в качестве *сквозных процессов* (рис. 1) [4]. При этом, результат (ресурс) выполнения предшествующего процесса является входными данными последующего процесса. Каждый такой процесс должен быть представлен соответствующим модулем в функциональной структуре MES-системы.

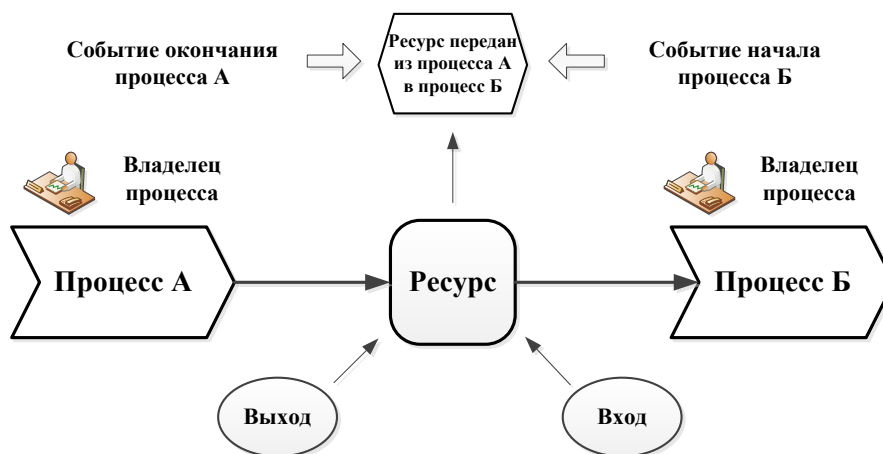


Рис. 1. Сквозные процессы

В результате анализа сквозных процессов можно определить функциональную структуру системы управления конкретным производством. Степень взаимосвязи разрабатываемых модулей между собой и с сопрягаемыми модулями систем управления предприятием (АСУ П) и производством (АСУ ТП) предлагается оценивать в виде весовых коэффициентов, отражающий объем ресурсов (данных), необходимых для выполнения связанными модулями определенных функций. Значение весового коэффициента целесообразно определять экспертным путем.

В целях исключения возможного управленческого «автоматизированного хаоса» предлагается разработку функциональных модулей выполнять поэтапно, начиная с модулей с максимальными коэффициентами степени взаимосвязи ресурсов.

В качестве примера, на рисунке 2 приведена структура функционального модуля управления заказами на готовую продукцию предприятия.

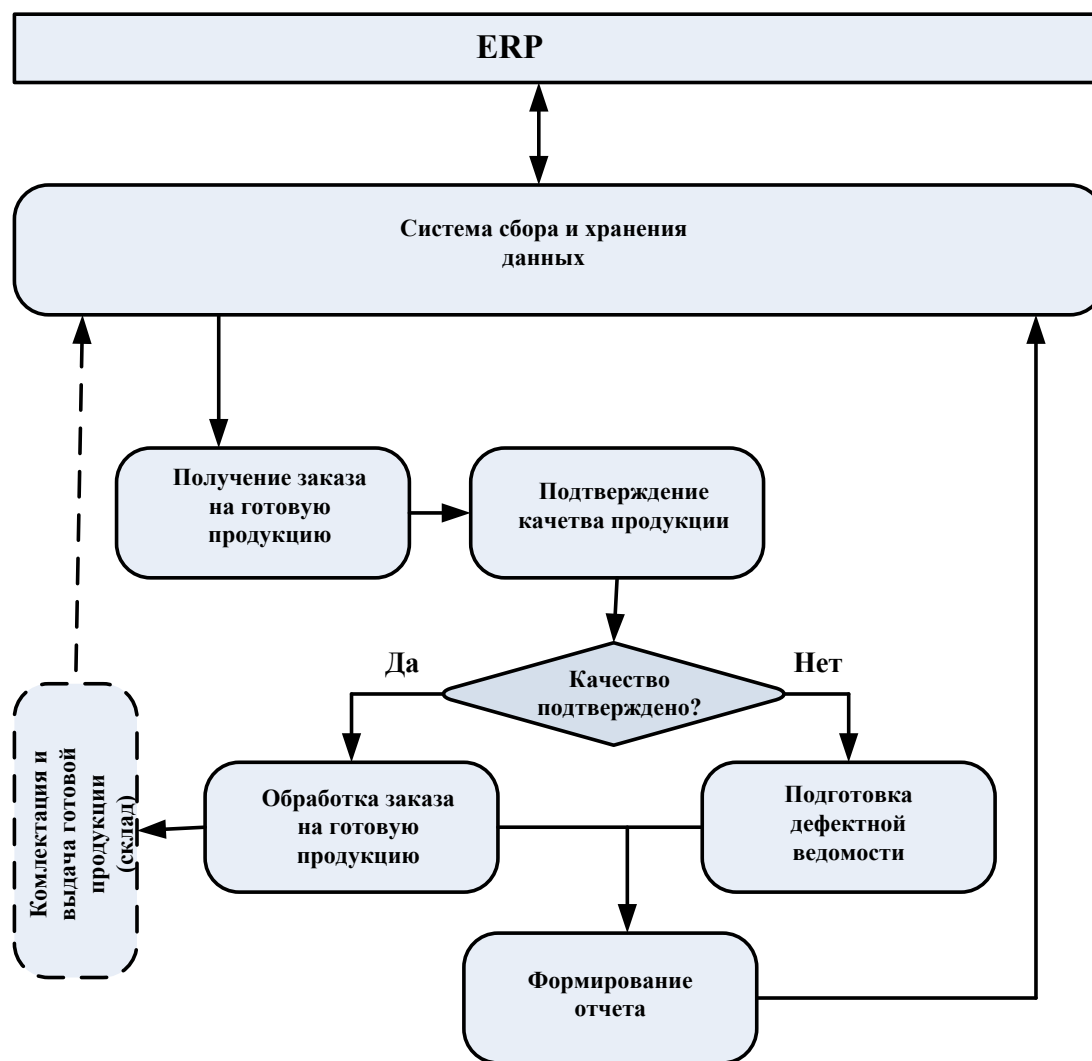


Рис. 2. Функциональная структура модуля управления заказами

Важно отметить, что в качестве основного функционального модуля исполнительной системы управления производством целесообразно разработать единую *систему сбора и хранения данных*, обеспечивающую единый формат данных для всех функциональных модулей и уровней управления предприятием.

Список используемых источников

1. Прудников Д. Проблемы и перспективы отечественных MES. URL: <https://www.itweek.ru/industrial/article/detail.php?ID=234550>, (дата обращения: 31.03.2026).
2. MES в России: проблемы и решения. // Информатизация и системы управления в промышленности «ИСУП», 2010. № 1(25). URL: <https://isup.ru/articles/1/428/> (дата обращения: 02.04.2026).
3. «Северсталь» впервые представила систему интегрированного планирования // URL: https://www.cnews.ru/news/line/2024-04-18_severstal_vpervye_predstavila (дата обращения: 02.04.2026).
4. Репин В. В., Елиферов В. Г. Процессный подход к управлению. Моделирование бизнес-процессов / Владимир Репин, Виталий Елиферов. М.: Манн, Иванов и Фербер, 2013. 544 с. ISBN 978-5-91657-554-5.

ON THE DEVELOPMENT OF AN AUTOMATED PRODUCTION MANAGEMENT SYSTEM

Lyubimov A., Ulasik V.

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

In the context of industrial digitalization, the automation of management and production processes has become critical. One of the effective tools for optimizing the operation of industrial enterprises is the Manufacturing Execution System (MES), which provides real-time monitoring and control of production processes. This paper highlights the main challenges in implementing domestic and foreign MES systems. The proposed solution is to develop MES systems in a phased approach based on a process-oriented methodology, taking into account the interconnectedness of the developed functional modules with the existing management systems at the enterprise.

Key words: *production management, information systems for managing production processes, and the process approach*

ГРНТИ 28.23.24

УДК 519.67 +573.6

ИМПЛИЦИТНОСТЬ КОМПЬЮТЕРНЫХ ПРОЦЕДУР СИНТЕЗА СУЖДЕНИЙ

Л. М. Макаров

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Актуальность направления поиска формализованных правил синтеза суждений неразрывно связана с успехами физических наук, в значительной степени использующих современные концепции квантового сознания. Проникновенное исследование возможностей создания технических систем, обладающих разумом и сознанием, реализуется современными инструментальными средствами математического моделирования, что актуализирует проблему воспроизведения технологических процедур, реализуемых компьютерными средствами.

В материале работы рассмотрена математическая модель, демонстрирующая возможность воспроизведения паттернов длительного хранения, по аналогии с естественной структурой головного мозга человека.

компьютерное моделирование, нечеткая логика, искусственный интеллект

Современная научная картина мира опирается на закон сохранения энергии, из которого вытекают два важных принципа – принцип каузальной замкнутости физического мира и принцип эпистемологической полноты. В таком случае постулируется тезис, что у всякого физического события может быть только физическая причина и только физическое следствие, ибо нарушение первого условия ведет к возникновению физической энергии из ничего, а нарушение второго означает ее бесследное исчезновение [1].

Традиционно обсуждение основ казуальности осуществляется с привлечением математики и теории случайных процессов. Именно на какой платформе удастся воспроизвести постановочную часть многих важных для познания проблем, например формируемых в терминах и понятиях научной дисциплины эпистемологии, оперирующей понятиями «объект – знание»

В этом смысле термин «имплицитность», рассматриваемый в контексте компьютерных процедур синтеза суждений указывает на наличие неявных, не выраженных явно элементов в процессе обработки информации, которые требуют дополнительного анализа или учета при разработке и использовании компьютерных технологий. Традиционно эта тематическая линия формируется на рассмотрении возможности создания компьютерных технологий, предоставляющих расширенные представления о мыслительной деятельности человека [2].

Акцентируя внимание на возможности выделения существенных тематических линий в обсуждаемой проблеме оказывается возможным рассмотрение нескольких научных направлений: вычислительной математики, нейропсихологии, математического моделирования, системного анализа. В качестве исходной посылки выделяется тезис: если на физические события влияет нематериальный сознательный опыт человека, то энергетический потенциал рабочего процесса должен происходить из нематериального источника. Расширенное рассмотрение тезиса порождает суждение, согласно которому физические события окружающего мира влияют на процессы проявления сознания, что воспринимается как «вплетенная встраиваемость» наблюдаемых проявлений физического пространства в сознание человека. И это справедливо поскольку энергетика обсуждаемых процессов может быть выражена в реальных физических показателях. Принцип эпистемологической полноты физики сводится к тому, что для прогнозирования активности любой сколь угодно сложно устроенной физической системы (в том числе головного мозга) достаточно собственно физических законов, параметров и свойств.

В общей постановке задачи о существе сознания рассматриваются многочисленные теории мышления, претендующие на научный статус, которые должны объяснять без нарушения вышеуказанных принципов, как становится возможным, что субъективно-идеальные феномены психики продуцируются объективно-материальными процессами, протекающими в коре головного мозга.

Если принять за основу материалистическую онтологию и полагать, что в бытийной основе Вселенной лежат физически взаимодействующие частицы и поля, то вынуждены признать, что биологические, психические и социальные структуры возникают в процессе эволюции биофизических систем. В таком случае следует признать, что существуют разные уровни описания одной и той же сложно устроенной системы: биологической, психической или социальной. И все же несмотря на это, поведение биосистем в силу принципа эпистемологической полноты физики должно с максимальной возможной точностью прогнозироваться на основе физических законов, параметров и свойств, определяющих взаимодействие микроскопических элементов, из которых состоит рассматриваемая система.

По современным представлениям развитие и поведение сложных систем подчиняется законам квантовой механики. Тогда в онтологической основе любых феноменов, в том числе и ментальных, должны находиться принципы квантовой механики и квантово-механические понятия. В противном случае окружающий мир утрачивает онтологическое единство, и в том числе естественнонаучное описание Космоса. Другими словами, все

виды и свойства на любом уровне иерархии наук являются видами квантово-механических свойств, безотносительно к тому, является ли данная область физикой, биологией или психологией. Согласно квантовой физике, не только электроны, протоны и другие частицы, но любой существующий объект подчиняется законам квантовой механики.

В таком случае объяснение ментального опыта, если не возникает желания противоречить научной парадигме квантовой физики, использующей инструментарий математического моделирования, необходимо выстраивать на онтологическом и концептуальном базисе квантовой механики [3]. Этот тезис позволяет декларировать, что квантовая теория сохраняет принцип каузальной замкнутости физического мира и принцип эпистемологической полноты биофизики, что естественным образом проявляется в особых квантовых эффектах, к которым можно отнести суперпозицию состояний, индетерминизм, запутанность и коллапс волновой функции. При этом в биофизике квантового типа естественным образом проявляется потенциал, способный раскрыть суть проблемы мышления и сознания [4,5,6].

В настоящее время известен квантовый подход к проблеме возникновения сознания Р. Пенроуза базирующийся на теории квантового нейрокомпьютинга, в соответствии с которым ментальный опыт продуцируется квантовыми процессами, протекающими в нейронных ансамблях, содержащих специальные структурные элементы микротрубочки, образующих нервную ткань головного мозга. По мнению Р. Пенроуза, структурные элементы нейрона – микротрубочки надо рассматривать как элементарные структуры, созданные Природой по уникальной технологии и имеющиеся практически у всех живых организмах должны обладать способностью длительное время воспроизводить и сохранять информационные пакеты, инициализируемые сенсорной сетью. Высказанное мнение в 1980 г. так и осталось правдивой догадкой до настоящего времени [2].

Микротрубочки благодаря своим уникальным свойствам выполняют целый ряд ключевых функций на всех этапах жизни нервной клетки, в том числе способствуют образованию памяти. Несмотря на высокую степень вариабельности сигнальных пакетов, создаваемых периферической рецепторной сетью проходящих через нейронную ткань, здесь поддерживается высокий уровень обработки, результатом которого является формирование нейронных образов – паттернов. Ментальные состояния нейронной сети, как набор паттернов, продуцируются объективной редукцией (OR) – спонтанным коллапсом волновой функции, который происходит в момент рецепции событий и процессов внешнего мира. Коллапс волновой функции набора нейронов происходит мгновенно и порождает серию нейронных потенциалов, обладающих способностью длительное время демонстрировать

трек произошедших событий, что позиционируется как фрагмент базы данных. На большом наборе нейронов головного мозга подобный процесс может фиксировать масштабные квантовые процедуры, формирующие «разумные события» из отдельных OR-возможностей.

Методология построения математической модели «нейронной памяти»

Обсудим основные определения реляционной базы данных и выделим идентификаторы, способные воспроизводить группы примерно равных понятий [6]. Принимая это, условие нетрудно воспроизвести вариативный блок событий, например, создаваемых одним из каналов сенсорной сети организма в формате матрицы (рис. 1), как образа фрагмента нейронной сети. Математическую модель вариативного блока создадим с использованием генератора случайных чисел по выражению:

$$S = g_i * H_e , \quad (1)$$

где g_i – весовой коэффициент компоненты в сигнальном пакете;

H_e – численный показатель элемента матричной структуры (1; 2; 3)

Положим $g_i = 56$

Для иллюстративности воспроизводимых процессов в модели используем вычислительную среду EXCEL. Имеем табличную структуру (табл. 1).

ТАБЛИЦА 1. Макет модели из 4 элементов

	56			
	1	2	3	4
1	168	224	168	224
2	168	224	224	168
3	224	224	112	224
4	224	112	168	56

Воспользуемся аппаратом «мягких вычислений» Л. Заде [2]. Исполним формализм преобразования матрицы по выражению:

$$\text{Если } a_{ij} > a_{(i+1)j} \text{ то } a_{ij}, \text{ иначе } a_{(i+1)j} \quad (2)$$

Тогда имеем модифицированную структуру матрицы (табл. 2)

ТАБЛИЦА 2. Модифицированный 1 макет модели нейронного пакета

		1	2	3	4

	1	168	224	224	224
	2	168	224	224	224
	3	224	224	224	224
	4	224	224	224	224
Среднее					
224		224	224	224	224

Повторим процедуру и создадим модифицированный 2 макет модели нейронного пакета.

ТАБЛИЦА 3. Модифицированный 1 макет модели нейронного пакета

		1	2	3	4
	1	224	112	168	56
	2	224	112	168	56
	3	224	112	168	112
	4	224	112	168	168
Среднее					
168		224	112	168	168

Повторим процедуру и создадим модифицированный 3 макет модели нейронного пакета.

ТАБЛИЦА 4. Модифицированный 1 макет модели нейронного пакета

		1		2	3	4
	1	224		112	168	56
	2	224		112	168	56
	3	224		112	168	112
	4	224		112	168	168
Среднее						
168		224		112	168	168

Представленные результаты моделирования формирования нейронных пакетов, представленных в формате компактной матрицы, отчетливо демон-

стрируют постоянство финишных результатов, характеризующих эффект «памяти» на нейронной сети головного мозга.

Полученный результат можно размножить для разных весовых коэффициентов g_i , но финишный результат останется неизменным. Этот факт указывает на возможность воспроизвести биологическую память субъекта, при условии наличия процедур «трансформации» элементов исходной матрицы событий. Продолжая эту мысль, можно сказать, что психические переживания, представляющие собой последовательность дискретных событий, также являются образами квантового и классического порядка.

Список используемых источников

1. Велманс М. Как отличать концептуальные моменты от эмпирических при изучении сознания // Методология и история психологии. 2009. Т. 4. Вып. 3. С. 42-54.
2. Борисов В. В. Основы теории нечетких множеств 2024 г.
3. Пенроуз Р., Шимони А., Картрайт Н., Хокинг С. Большое, малое и человеческий разум. СПб.: Амфора, 2008.
4. Менский М. Б. Концепция сознания в контексте квантовой механики // Успехи физических наук. 2005. № 4. С. 413-435.
5. Менский М. Б. Интуиция и квантовый подход к теории сознания // Вопросы философии. 2015. № 4. С. 48-57.
6. Симанов А. Л., Спасков А. Н. Квантовая основа сознания, или онтология психофизической квантовой реальности // Философия науки. 2020. № 1 (84). С. 128-135.

IMPLICITNESS OF COMPUTER PROCEDURES FOR SYNTHESIS OF JUDGMENTS

Makarov L.

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

The relevance of the search for formalized rules for the synthesis of judgments is inextricably linked to the progress of the physical sciences, which make extensive use of modern concepts of quantum consciousness. The profound exploration of the possibilities for creating technical systems with intelligence and consciousness is being carried out using modern tools for mathematical modeling, which highlights the challenge of reproducing technological procedures using computer systems.

In this paper, we present a mathematical model that demonstrates the ability to reproduce long-term storage patterns, similar to the natural structure of the human brain.

Key words: computer modeling, fuzzy logic, artificial intelligence

УДК 621.396

ГРНТИ 47.45.29

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТИПАХ ПОМЕХ

А. А. Мохова

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В статье исследуется метод адаптации весовых коэффициентов линейной антенной решетки на основе максимизации отношения сигнал-помеха-шум (SINR) для подавления нестационарных помех – импульсных и мерцающих. Рассматривается неподвижная антенная решетка из четырех элементов и три неподвижных источника полезного сигнала. Предложенный алгоритм обеспечивает эффективное подавление нестационарных помех, что подтверждается высоким отношением сигнал-помеха-шум на выходе и формированием глубоких провалов в диаграмме направленности в сторону источника помехи. Выявлены ограничения метода: короткие импульсы, высокая частота переключения, неравномерная скважность и пространственная близость помехи к полезному сигналу.

адаптивная антенная решетка, отношение сигнал-помеха-шум, импульсная помеха, мерцающая помеха, диаграмма направленности, нестационарные помехи, пространственная фильтрация

Адаптивные антенные решетки широко применяются для пространственной фильтрации сигналов. В основе большинства алгоритмов лежит предположение о стационарности или квазистационарности помеховой обстановки на интервале обучения. Однако в реальных условиях радионавигации и радиомониторинга все чаще встречаются нестационарные помехи, параметры которых меняются за время, сравнимое с длительностью обучающей выборки. К числу таких помех относятся: импульсные помехи с большой амплитудой и малой скважностью; мерцающие помехи, создаваемые двумя и более передатчиками, работающими в режиме временного разделения. Для таких помех классические методы либо не обеспечивают требуемого подавления, либо приводят к неустойчивости весовых коэффициентов. Это определяет актуальность разработки алгоритмов, способных адаптировать структуру ограничений в зависимости от текущей помеховой ситуации. В данной работе используется метод, основанный на максимизации отношения сигнал-помеха-шум – SINR (Signal-to-Interference-plus-Noise

Ratio), что позволяет динамически перестраивать веса при изменении помехи [1].

В работе рассматривается неподвижная линейная антенная решетка, состоящая из четырех элементов, расстояние между которыми выбрано равным половине длины волны несущего колебания. Такая решетка обладает тремя степенями свободы для формирования нулей диаграммы направленности, что достаточно для подавления одного источника помехи при одновременном сохранении усиления в направлениях трех неподвижных источников полезного сигнала, приходящих с фиксированных направлений θ_s . Пространственное положение как антенной решетки, так и источников полезного сигнала остается неизменным в процессе всего эксперимента, что позволяет сосредоточиться именно на исследовании адаптации к нестационарным помехам без учета дополнительных эффектов, связанных с перемещением источников или поворотом антенны.

Для решения поставленной задачи необходимо сформулировать критерий адаптации и математический аппарат, позволяющий рассчитывать оптимальные весовые коэффициенты [2]. Ниже описывается используемый метод, основанный на минимизации выходной мощности при линейных ограничениях.

На каждом временном окне сначала формируется полная ковариационная матрица входных процессов, которая складывается из трех составляющих: $R = R_s + R_p + R_n$, где R_s – ковариационная матрица полезных сигналов, R_p – ковариационная матрица помехи, R_n – матрица собственного шума приемных каналов. Далее решается задача оптимизации весовых коэффициентов w с линейными ограничениями. Критерием оптимизации выступает минимизация выходной мощности смеси сигнала, помехи и шума, что эквивалентно максимизации отношения SINR: $w_{opt} = w^H R w$.

При этом на веса накладываются ограничения, требующие, чтобы в направлениях прихода полезных сигналов коэффициент усиления решетки был равен единице, а в направлении активного источника помехи – нулю. В матричной форме эти ограничения записываются как $w^H A = g^T$, где A – матрица направляющих векторов активных источников, а g – вектор желаемых коэффициентов усиления, который для полезных сигналов содержит единицы, а для помехи – ноль. Решение такой задачи с линейными ограничениями записывается в виде: $w_{opt} = R^{-1} A (A^H R^{-1} A)^{-1}$.

Полученный вектор весов w_{opt} обеспечивает максимально возможное значение SINR при заданных ограничениях. Предложенный подход позволяет динамически перестраивать весовые коэффициенты при изменении структуры помехи, автоматически подстраивая систему ограничений под текущую помеховую ситуацию.

Для оценки работоспособности предложенного алгоритма первым этапом было проведено моделирование ситуации с импульсной помехой. Три полезных сигнала приходят с направлений $\theta_1 = -30^\circ$, $\theta_2 = 0^\circ$ и $\theta_3 = 30^\circ$, имеют равные амплитуды и различные начальные фазы. Импульсная помеха имеет амплитуду $A_p = A_1 = A_2 = A_3$ и длительность импульса 0,2 с, направление прихода $\theta_p = 60^\circ$. Когда импульсная помеха отсутствует, алгоритм не накладывает ограничения на подавление, так как детектор помехи не срабатывает (рис.1). При появлении импульсной помехи алгоритм мгновенно добавляет ограничение, требующее нулевого усиления в направлении помехи. Расчет мощностей на выходе адаптивной решетки для момента 0,3 с показывает, что мощность полезного сигнала составляет $P_s \approx 25$ дБ, мощность помехи на выходе $P_p \approx -133$ дБ, а отношение SINR достигает 35 дБ. Это свидетельствует об эффективной работе алгоритма в условиях импульсной помехи [3].

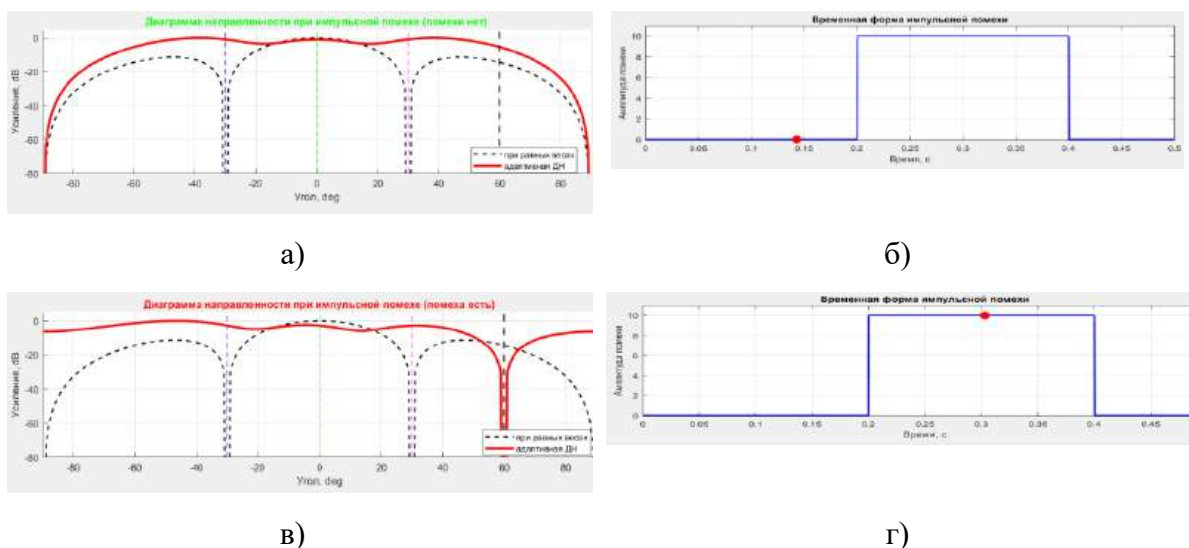


Рис. 1. Адаптация диаграммы направленности при импульсной помехе ($\theta_1 = -30^\circ$, $\theta_2 = 0^\circ$, $\theta_3 = 30^\circ$, $\theta_p = 60^\circ$): а) диаграмма направленности при отсутствии помехи; б) временная форма импульсной помехи в момент времени 0,14 с; в) диаграмма направленности при наличии помехи; г) временная форма импульсной помехи 0,3 с

В ходе моделирования были выявлены ситуации, в которых эффективность предложенного алгоритма снижается. Первое ограничение связано со случаем, когда амплитуда помехи значительно превышает амплитуды полез-

ных сигналов. Это связано с тем, что мощная помеха вносит основной вклад в ковариационную матрицу, поэтому алгоритм, минимизируя выходную мощность, неизбежно снижает усиление и в направлениях полезных сигналов.

Второе ограничение связано с обработкой коротких импульсных помех, длительность которых становится соизмеримой с длительностью окна адаптации или меньше ее. Во-первых, помеха может полностью попасть в окно адаптации лишь в небольшом количестве окон, а в остальных окнах алгоритм не видит помеху и не формирует провал. Во-вторых, если импульс короче окна, то при усреднении по окну его вклад в ковариационную матрицу оказывается заниженным, и глубина формируемого провала уменьшается. На рис. 2 показана диаграмма направленности, зафиксированная после окончания импульсной помехи. Несмотря на то, что в данный момент помеха отсутствует, адаптивная диаграмма направленности по-прежнему содержит глубокий провал в направлении 60° , где раньше была помеха. Таким образом, предложенный метод эффективен для импульсных помех, длительность которых не менее чем в 2-3 раза превышает длину окна.

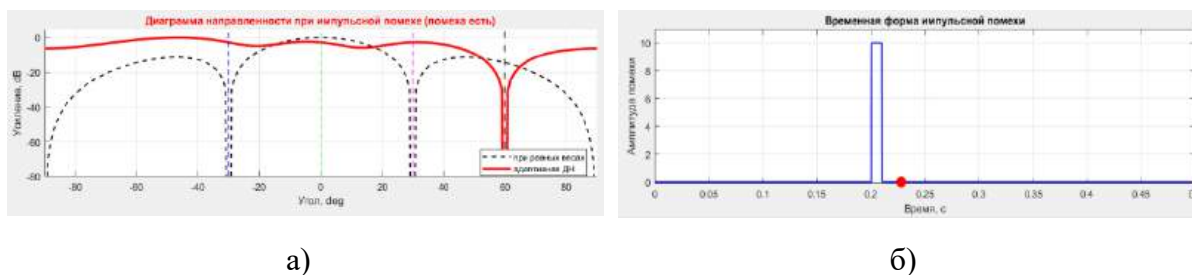
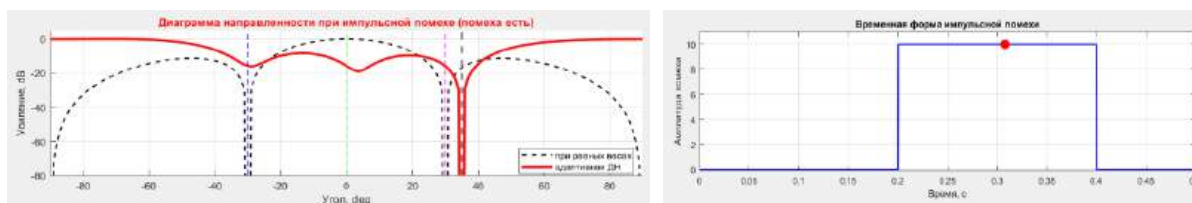


Рис. 2. Адаптация диаграммы направленности при короткой импульсной помехе длительностью 0,01с ($\theta_1 = -30^\circ$, $\theta_2 = 0^\circ$, $\theta_3 = 30^\circ$, $\theta_p = 60^\circ$): а) диаграмма направленности при отсутствии помехи; б) временная форма импульсной помехи в момент времени 0,23 с

Третье ограничение связано с пространственной близостью источника помехи и одного из полезных сигналов. При попытке подавить помеху, расположенную слишком близко к полезному сигналу, адаптивные веса неизбежно ослабляют полезный сигнал, что приводит к снижению отношения SINR. На рис. 3 представлен случай, когда мощность помехи сопоставима с мощностью полезных сигналов, а ее направление прихода ($\theta_p = 35^\circ$) находится в непосредственной близости от одного из полезных сигналов ($\theta_3 = 30^\circ$). Расчет мощностей на выходе адаптивной решетки при 0,3 с показывает, что отношение SINR в данном случае составляет 25 дБ, что заметно ниже значений, достигаемых при достаточной пространственной разнесенности помехи и полезных сигналов.

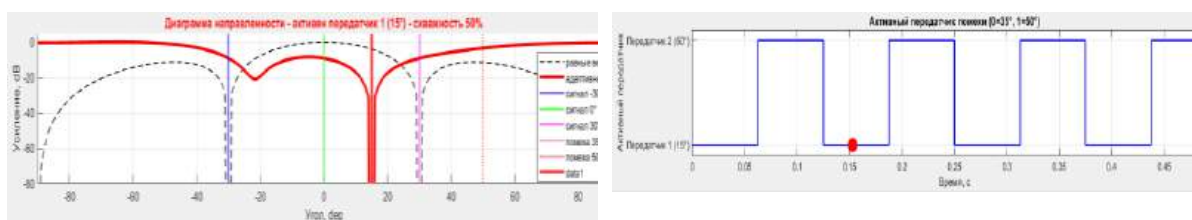


а)

б)

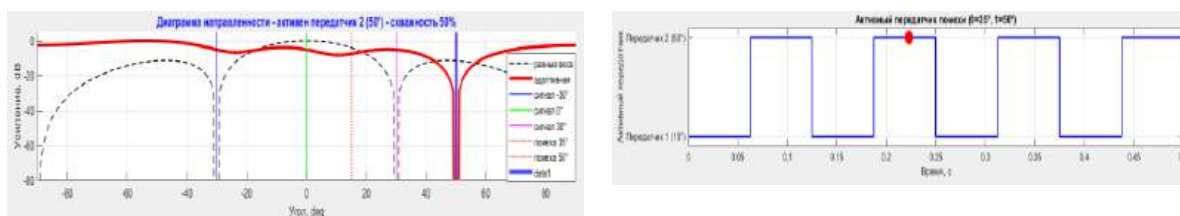
Рис. 3. Адаптация диаграммы направленности при пространственной близости импульсной помехи и полезного сигнала ($\theta_1 = -30^\circ$, $\theta_2 = 0^\circ$, $\theta_3 = 30^\circ$, $\theta_p = 35^\circ$): а) диаграмма направленности; б) временная форма импульсной помехи в момент времени $t \approx 0,3$ с

Вторым этапом работы было исследование адаптации антенной решетки к мерцающей (переключающейся) помехе [4]. Мерцающая помеха создается двумя независимыми передатчиками, расположенными в пространстве под разными углами и работающими в режиме временного разделения. В данной модели используются два источника помехи с направлениями $\theta_{p1} = 15^\circ$ и $\theta_{p2} = 50^\circ$, которые включаются попеременно с частотой переключения 8 Гц. Как видно из рис. 4, алгоритм успешно определяет активный источник помехи и накладывает ограничение на подавление именно того направления, которое активно в данный момент. Когда активен первый передатчик ($\theta_{p1} = 15^\circ$), в диаграмме направленности формируется глубокий провал на 15° , а когда активен второй передатчик ($\theta_{p2} = 50^\circ$) – провал смещается на 50° . При этом усиление в направлениях полезных сигналов ($-30^\circ, 0^\circ, 30^\circ$) сохраняется на уровне, близком к единице. Результаты для момента $t = 0,35$ с (второй передатчик активен) показывают: мощность полезного сигнала на выходе $P_s \approx 25$ дБ, мощность помехи $P_p \approx -132$ дБ, отношение SINR достигает 34 дБ.



а)

б)



в)

г)

Рис. 4. Адаптация диаграммы направленности при мерцающей помехе с частотой переключения 8 Гц ($\theta_1 = -30^\circ$, $\theta_2 = 0^\circ$, $\theta_3 = 30^\circ$, $\theta_{p1} = 15^\circ$, $\theta_{p2} = 50^\circ$): а) диаграммы направленности при включенном передатчике 1; б) текущие состояние активного передатчика 1 в 0,15 с; в) диаграммы направленности при включенном передатчике 2; г) текущий состояние активного передатчик 2 в 0,23 с

Моделирование показало, что существуют ситуации, в которых предложенный метод хуже справляется с подавлением мерцающей помехи. Первое ограничение связано с высокой частотой переключения. Если частота мерцания превышает 20–25 Гц, то длительность полупериода становится соизмеримой с длиной окна адаптации или меньше нее. В этом случае временное окно может содержать сигналы обоих передатчиков одновременно, и алгоритм не может однозначно определить активный источник. В результате адаптивная диаграмма направленности пытается подавить оба направления одновременно, что при ограниченном числе степеней свободы невозможно, и качество подавления каждого из источников падает.

Второе ограничение, наглядно демонстрируемое на рис. 5, связано с неравномерной скважностью переключения (30 % и 70 %). Поскольку второй передатчик (50°) активен 70 % времени, алгоритм «привыкает» к нему и удерживает провал в его направлении даже в те моменты, когда он выключается и включается первый передатчик (15°). Кроме того, из-за доминирования второго передатчика в общей статистике глубина провала для первого передатчика (15°) оказывается меньше, чем для второго.

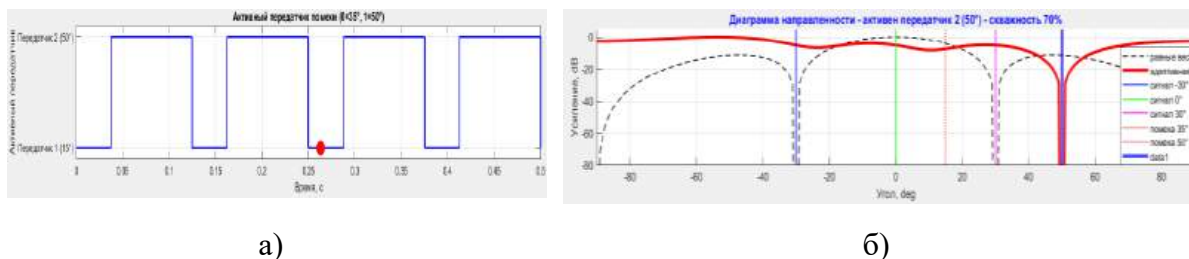


Рис. 5. Влияние неравномерной скважности на формирование провалов в диаграмме направленности: а) текущий состояние активного передатчик 1; б) диаграмма направленности в момент активности первого передатчика

Третье ограничение связано с близостью угловых направлений двух передатчиков помехи. Если оба передатчика помехи находились вблизи друг друга (менее $10\text{--}15^\circ$), алгоритм вообще не может их различить, формируя один широкий провал, перекрывающий оба направления.

В результате работы исследован метод адаптации весовых коэффициентов антенной решетки на основе максимизации SINR, позволяющий эффективно подавлять импульсные и мерцающие помехи. Выявлены основные ограничения метода: для импульсной помехи – короткая длительность импульса и пространственная близость к полезному сигналу; для мерцающей помехи – высокая частота переключения и неравномерная скважность. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании адаптивных антенных решеток в системах радиосвязи и радиоэлектронной борьбы.

Список используемых источников

1. Монзинго Р.А., Миллер Т.У. Адаптивные антенные решетки: введение в теорию. М.: Радио и связь, 1986. 448 с.
2. Trees H.L. Van. Optimum Array Processing. Wiley, 2002. 1426 с.
3. Нестеров Е. В., Кондратенко Т. В., Кузнецов А. В. Анализ влияния импульсных помех на кабели связи в сетях передачи данных с коммутацией пакетов // Научный результат. Информационные технологии. 2020. Т. 5, № 1. С. 35–39. URL: <https://clck.su/Fkzvo> (дата обращения: 15.05.2026).
4. Никольский Б. А. Методы и средства радиоэлектронной защиты летательных аппаратов: учеб. пособие. Ч. 1 / Самар. гос. аэрокосм. ун-т. Самара, 2004. 110 с.

Статья представлена научным руководителем, профессором кафедры РТ СПбГУТ, доктором технических наук, профессором Е. И. Глушанковым.

INVESTIGATION OF THE NOISE IMMUNITY OF NAVIGATION SYSTEMS UNDER VARIOUS TYPES OF INTERFERENCE

Mokhova A.

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

The article explores a method for adapting the weighting coefficients of a linear antenna array based on maximizing the signal-to-noise ratio (SINR) to suppress non-stationary interference – pulsed and flickering. A fixed antenna array of four elements and three fixed sources of a useful signal are considered. The proposed algorithm provides effective suppression of non-stationary interference, which is confirmed by the high signal-to-noise ratio at the output and the formation of deep dips in the radiation pattern towards the source of interference. The limitations of the method are revealed: short pulses, high switching frequency, uneven borehole and spatial proximity of interference to the useful signal.

Key words: *adaptive antenna array, signal-to-noise ratio, pulse interference, flickering interference, radiation pattern, non-stationary interference, spatial filterin*

УДК 538.958 / 538.971

ГРНТИ 47.09.31

СТРУКТУРНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ОКСИДНОГО ДИЭЛЕКТРИКА ТАНТАЛОВЫХ И НИОБИЕВЫХ ЕМКОСТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КАК ФАКТОР ОБЕСПЕЧЕНИЯ И ОГРАНИЧЕНИЯ УСЛОВИЙ ИХ РАБОТОСПОСОБНОСТИ

Ю. С. Остроумова¹, С. Д. Ханин²

¹Военно-медицинская академия им. С. М. Кирова

²Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Анализируется роль в формировании токовых и надежностных характеристик танталовых и ниобиевых конденсаторов структурной организации их оксидного диэлектрика на различных ее уровнях. Показывается, что характерные для диэлектрика особенности структурной организации на макро- и микроскопическом уровнях обеспечивают необходимое для функционального применения свойства, а на мезоскопическом уровне, напротив, ограничивают допустимые условия нагружения и временной ресурс. Формулируются направленные на улучшение указанных характеристик и расширение функциональных возможностей танталовых и ниобиевых конденсаторов рекомендации по модернизации технологии формирования оксидного диэлектрика.

танталовые и ниобиевые конденсаторы, оксидные диэлектрические пленки, структурная организация, диэлектрические и электроизоляционные свойства, временной ресурс

Задачи улучшения эксплуатационных характеристик и расширения функциональных возможностей танталовых и ниобиевых конденсаторов были и остаются в центре внимания многих исследователей и разработчиков [1-3]. Это обусловлено, с одной стороны, высокими, практически рекордными удельными параметрами таких конденсаторов [3] и, с другой стороны, существенной ограниченностью условий их нагружения, прежде всего по полярности и величине допустимого рабочего напряжения. Непременным является и стремление к повышению временного ресурса емкостных элементов [4, 5].

Значительное внимание в плане улучшения токовых и надежностных характеристик танталовых и ниобиевых конденсаторов уделяется транспортным свойствам их рабочего диэлектрика – анодных оксидных пленок на поверхности металла [1]. Вместе с тем, до настоящего времени отсут-

ствуется ясность в вопросе о влиянии на эти свойства структурной организации оксидного диэлектрика, что могло бы стать направляющей в изыскании продуктивных подходов к решению указанной задачи.

Настоящая работа призвана восполнить этот пробел. На основе проведенного в ней анализа показывается, что особенности структуры оксидного диэлектрика на различных уровнях ее организации разнонаправлено влияют на представляющие практический интерес свойства: на макро- и микроскопическом уровнях их обеспечивают, а на мезоскопическом уровне, напротив, ограничивают. На основе сформулированных представлений выработаны определенные рекомендации по модификации технологии формирования рабочего оксидного диэлектрика.

Выделенная на макроскопическом уровне особенность структурной организации оксидных диэлектрических пленок тантала и ниобия состоит в их высокой однородности на больших площадях анодируемого металла, что принципиально важно в плане миниатюризации емкостных элементов. О макроскопической однородности, наряду с общими представлениями об электрохимическом оксидировании металла, свидетельствуют результаты электронно-микроскопических исследований структуры и зондовых измерений распределения плотности тока по площади оксидированных образцов [1, 2].

Существенная особенность структуры оксидного диэлектрика на микроскопическом уровне состоит в ее неупорядоченности, что является важным фактором обеспечения высоких диэлектрических и электроизоляционных свойств. О неупорядоченности свидетельствуют данные рентгеноструктурного анализа (исследования проводились в Петрозаводском государственном университете на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3) и EXAFS-спектроскопии (эксперименты проводились в НИИ Физики Ростовского-на-Дону университета на лабораторном EXAFS-спектрометре, сконструированном на основе рентгеновского дифрактометра ДРОН-3) [6].

Указанные особенности обеспечивают требуемые электроизоляционные и диэлектрические свойства оксидных пленок. Подтверждением тому в части проводимости и электропрочностных свойств являются результаты сравнительного анализа транспортных характеристик аморфного и кристаллического металлооксидов, ближний порядок в атомном строении которых одинаков, свидетельствующие о превосходстве аморфного материала как диэлектрика [7]. Причина последнего состоит в прыжковом механизме электронного транспорта с присущей ему малостью подвижности носителей заряда [8, 9].

Сильный разброс электронных локализованных состояний по взаимным расстояниям и энергиям в аморфном диэлектрике обуславливает значимый вклад в диэлектрическую проницаемость электронно-релаксационной поляризации. На наличие последней указывает целый ряд экспериментально установленных закономерностей: слабая дисперсия емкости в широком диапазоне частот, временная зависимость изотермического релаксационного тока, влияние на термостимулированный ток условий предварительной поляризации, кинетика восстановления электретной разности потенциалов после закорачивания электретированного диэлектрика. Та же причина обуславливает сравнительно малый тангенс угла диэлектрических потерь и его слабую частотную зависимость на не слишком высоких частотах, когда емкостной элемент может характеризоваться как система с сосредоточенными параметрами.

Производным от достигаемой диэлектрической проницаемости оксидов и величины допустимой напряженности электрического поля является высокое значение удельной энергии танталовых и ниобиевых конденсаторов [2], что открывает возможности их применения как энергонакопительного элемента в автономных источниках питания.

Противонаправленное, ограничивающее условия работоспособности танталовых и ниобиевых конденсаторов влияние оказывают особенности структуры их диэлектрика на мезоскопическом уровне.

Речь главным образом идет о сопряженных с неупорядоченностью структуры и агрегацией дефектов нестехиометрии типа кислородных вакансий каналах длиннопробежной диффузии ионов, наличие которых ускоряет процессы электрического разрушения в металлооксидных структурах при обратном смещении и при долговременном электротепловом нагружении в нормальном для конденсаторов режиме [7].

В первом режиме, как показывают результаты структурных исследований, ответственным за деградацию свойств диэлектрика является транспорт в нем водородосодержащих ионов, во втором режиме -происходящий электростимулированный рост металлооксида, вытесняющих аморфную в исходном состоянии пленку обусловлен транспортом водородосодержащих ионов.

На существенную роль в динамике этих процессов наличия каналов длиннопробежной диффузии ионов указывают обнаруживаемая при катодной поляризации, вызываемая джоулевым разогревом термическая кристаллизация оксида [10] и зависимость степени кристалличности пленки при

нагрузении в нормальном режиме от времени, отвечающая модели роста кристаллов на заданном числе центров [11].

Следствием электростимулированного роста кристаллов металлооксида, в силу значительного токопотребления при нем и относительно высокой электронной проводимости новообразований является возрастание протекающего в структуре емкостного элемента тока утечки, что при длительном нагружении может приводить к утере прочности материала корпуса и в конечном счете к отказу конденсатора [12, 13]. Так, в оксидно-электролитических конденсаторах с танталовым корпусом последний при прохождении через структуру большого заряда охрупчивается вследствие происходящего наводороживания. Произведенная с учетом экспериментально установленной временной зависимости тока и критической в рассматриваемом аспекте величины проходящего заряда оценка ресурса конденсаторов дает сходящиеся с определяемыми посредством их испытаний значения [14].

Существенной, по-видимому, является роль неоднородности оксида на мезоскопическом уровне и в ограничивающем толщину анодного оксида и соответственно допустимое напряжение конденсаторов явлении искрения [15]. На это указывает сходство искрения с микроплазменным пробоем в местах повышенной напряженности электрического поля и сопряженная с искрением электролюминесценция, могущая быть следствием возбуждения структурных частиц электронным ударом.

Руководствуясь развитыми представлениями, сделан вывод о том, что улучшение характеристик и расширение области применения танталовых и ниобиевых конденсаторов должно способствовать повышению степени однородности структуры оксидного диэлектрика посредством технологических приемов, ведущих к ее уплотнению (гомогенизации) и стабилизации высшей степени окисления катионов металла.

Как показал эксперимент, желаемого уплотнения структуры оксидного диэлектрика можно достичь посредством постростовой высокотемпературной термообработки. Об этом свидетельствуют данные рентгеноструктурного анализа и EXAFS-спектроскопии, показывающие, что при наличии указанного воздействия в атомной структуре оксида исчезает короткая связь металл-кислород с малым координационным числом металла.

Вместе с тем, высокотемпературная термообработка приводит к частичному восстановлению оксида и соответственно возрастанию концентрации атомов металла в неопределенной степени окисления [16]. В этой связи с целью достижения желаемого результата вслед за постростовой восстановительной термообработкой осуществлялось реоксидирование базового ме-

талла, что, судя по фотоэлектронным спектрам валентных и остовных электронов, позволяет существенно уменьшить степень нестехиометрии состава. О последнем свидетельствует понижение плотности электронных состояний в квазизапрещенной зоне диэлектрика, на что указывают фотоэлектронные спектры валентных электронов.

В результате апробации указанного технологического приема на модельных образцах оксидированных тантала и ниобия было показано, что его использование позволяет добиться существенного уменьшения тока утечки и повышения временной стабильности свойств диэлектрика к электро-тепловому нагружению при обеих полярностях постоянного напряжения.

Другой целесообразный технологический прием состоит во введении в формовочный электролит и/или газовую среду постростовой химико-термической обработки оксида сильного окислителя.

Наконец, выразительных результатов удастся достичь при сочетании указанных технологических приемов, например, при двухстадийной формовке базового металла в электролите, содержащем сильный окислитель с промежуточной высокотемпературной термообработкой.

Список используемых источников

1. Ханин С. Д. Проблемы электрофизики металлооксидных конденсаторных диэлектриков – Обзоры по электронной технике. Сер. 5: Радиодетали и радиокомпоненты. М., 1990. Вып. 1(1524). 86 с.
2. Ханин С. Д., Воронцов В. Н., Денисова О. В., Адер И. И. Пассивные радиокомпоненты // Электрические конденсаторы. СПб.: СЗПИ, 2004. 166 с.
3. Freeman J. Tantalum and Niobium Based Capacitors. Science, Technology and Application. Springer, 2018. 125 p.
4. Геликман Б. Ю., Кристаллинский Л. Л. Вопросы качества радиодеталей. М.: Советское радио, 1980. 328 с.
5. Дьяконов М. Н., Коняхин В. Е., Костельова Л. А., Столов Л. А., Ханин С. Д. Высоконадежные танталовые конденсаторы // Электронная промышленность. 1983. № 6. С. 123.
6. Aleshina L.A., Malinenko B.P., Phophanov A.D., Yakovleva H.M. The short range order of anodic amorphous oxide films // Journal of Non-Crystalline Solids. 1986. Vol. 87, № 2. P. 350–360.
7. Физика и технология наноструктурированных функциональных материалов: Монография / Под ред. С. Д. Ханина и Ю. А. Кумзерова. СПб.: Издательство Военной академии связи, 2023. 396 с.
8. Khanin S. D. Kinetic electronic phenomena in metal oxide dielectric films // Materials Science Forum. Vol. 185-188. P. 563-572.
9. Ханин С. Д. Электронные свойства аморфных диэлектрических оксидов металлов. В монографии «Физика неупорядоченных и наноструктурированных оксидов и халькогенидов металлов» / Под ред. Г. А. Бордовского. Пб.: Изд-во РГПУ им. А. И. Герцена, 2011. С.69-104.

10. Гусинский Г. М., Карпухина Л. Г., Муждаба В. М., Найденов В. О., Томиленко Г. Ф., Ханин С. Д. Протонно-инжекционные явления в аморфном оксиде тантала // Физика твердого тела, 1987. Т. 29. № 11. С. 3253-3257.
11. Колмогоров А. Н. К статистической теории кристаллизации металлов // Известия АН СССР. Сер. математическая. 1937. Т. 3, № 3. С. 355-358.
12. Васильев А. Н., Костельова Л. А., Новотельнова А. В., Ханин С. Д. Электрические неустойчивости структуры и свойств аморфных оксидов металлов // Журнал технической физики. 1988. Т. 58. № 8. С. 1597-1600.
13. Khanin S. D. Structure inhomogeneities in the oxides and the properties of tantalum capacitors // Materials Science Forum. 1995. Vol. 185-188. P. 573-580.
14. Ханин С. Д. Электрическое разрушение аморфных металлооксидов в структурах емкостных элементов // Необратимые процессы в природе и технике: XII Всероссийская конференция: труды конф. М., 2023. С. 253-256.
15. Одынец Л. Л., Платонов Ф. С., Прокопчук Е. Н. Искрение при анодном окислении тантала и ниобия // Электронная техника. Сер. Радиодетали, 1972. Вып. 2(27). С. 37-42.
16. Дьяконов М. Н., Костиков Ю. П., Костров Д. В., Ханин С. Д. Исследование электронных состояний оксидов тантала и ниобия методом электронной спектроскопии // Известия АН СССР. Неорганические материалы. 1980. Т. 16, № 5. С. 881-885.

STRUCTURAL ORGANIZATION OF AN OXIDE DIELECTRIC TANTALUM AND NIOBIUM CAPACITIVE ELEMENTS AS A FACTOR OF PROVISION AND LIMITATION CONDITIONS OF THEIR WORKING CAPACITY

Ostroumova Yu.¹, Khanin S.²

¹ Military Medical Academy named after S. M. Kirov

² The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

The role of the structural organization of their oxide dielectric at various levels in the formation of current and reliability characteristics of tantalum and niobium capacitors is analyzed. It is shown that the structural organization features characteristic of a dielectric at the macro- and microscopic levels provide the properties necessary for functional use, while at the mesoscopic level, on the contrary, they limit the permissible loading conditions and time resource. Recommendations aimed at improving these characteristics and expanding the functionality of tantalum and niobium capacitors are formulated for modernizing the technology of forming an oxide dielectric.

Key words: tantalum and niobium capacitors, oxide dielectric films, structural organization, dielectric and electrical insulating properties, time resource

УДК 535.14

ГРНТИ 29.31.15

**ЗАКОН СМЕЩЕНИЯ ВИНА В АСТРОФИЗИЧЕСКОМ
КОНТЕКСТЕ: КАКОЙ МАКСИМУМ МЫ НАБЛЮДАЕМ?****Ф. Ф. Павлов**

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В статье рассматривается известная неоднозначность закона смещения Вина, связанная с тем, что положение максимума спектральной плотности излучения абсолютно черного тела зависит от выбора шкалы (длин волн или частот). Показано, что данное расхождение не является математическим парадоксом, а отражает физически различные способы измерения спектра. На примере Солнца ($T = 5800$ K) демонстрируется, что максимумы в шкалах λ и ν дают существенно разные значения (500 нм и 879 нм) и не могут быть согласованы даже через средние энергии фотонов. Установлено, что медиана и логарифмическая шкала являются единственными характеристиками, свободными от указанной неоднозначности. Особое внимание уделено тому, что спектрометры с разным принципом действия «нарезают» спектр по разному закону ($\Delta\lambda$ или $\Delta\nu$) и поэтому закономерно показывают разные максимумы для одного и того же излучения.

закон смещения Вина, формула Планка, спектральная плотность излучения, спектрометр

В статьях [1, 2] была подробно исследована неоднозначность закона смещения Вина: положение максимума спектральной плотности излучения абсолютно черного тела зависит от того, по какой шкале построен график – длин волн или частот. Максимум формулы Планка [3], описывающей равновесную спектральную плотность излучения абсолютно черного тела в шкале длин волн u_λ , не совпадает по положению с максимумом формулы в шкале частот u_ν . Если взять максимальную длину волны λ_m из закона смещения Вина для u_λ и пересчитать ее в частоту как $\nu_m = c/\lambda_m$, где $c = 2,99792458 \cdot 10^8$ – скорость света в вакууме, то эта частота не совпадает с максимальной частотой ν'_m из закона смещения Вина для u_ν .

Это не физический парадокс, а математическое следствие нелинейного соотношения длины волны и частоты $\lambda = c/\nu$. Было показано [1, 2], что проблема не устраняется даже при переходе к средним значениям энергии фотонов (как предлагали другие авторы [4]), поскольку средняя длина волны

и средняя частота также дают несовпадающие энергии. Единственная характеристика, свободная от этой неоднозначности – медиана и логарифмическая шкала.

Краткая сводная таблица основных результатов для Солнца при температуре $T = 5800$ К приведена в табл. 1.

ТАБЛИЦА. 1. Спектральные характеристики излучения Солнца

Характеристика	Числовое значение	Цвет/диапазон
Максимум по длине волны λ_m	500 нм	Циан
Соответствующая частота ν_m	$6 \cdot 10^{14}$ Гц	Циан
Максимум по частоте ν'_m	$3,41 \cdot 10^{14}$ Гц	ИК-диапазон
Соответствующая длина волны λ'_m	879 нм	ИК-диапазон
Средняя длина волны $\langle \lambda \rangle$	918 нм	ИК-диапазон
Среднеквадратичное отклонение σ	846 нм	ИК-диапазон
Средняя частота $\langle \nu \rangle$	$4,63 \cdot 10^{14}$ Гц	Красный
Средняя энергия $E_\gamma = hc / \langle \lambda \rangle$	$2,16 \cdot 10^{-19}$ Дж	-
Средняя энергия $E = h \langle \nu \rangle$	$3,07 \cdot 10^{-19}$ Дж	-
Медиана по длине волны λ_1	708 нм	Красный
Медианная частота ν_1	$4,23 \cdot 10^{14}$ Гц	Красный
Максимум логарифмической шкалы	633 нм	Красный
Соответствующая частота	$4,74 \cdot 10^{14}$ Гц	Красный

Из табл.1 видно, что для Солнца получаются разные цвета излучения абсолютно черного тела. Как будет показано ниже, все ответы одинаково правильны и одинаково реальны. Можно сделать следующие ключевые выводы:

- 1) положения максимумов неоднозначны: $\lambda_m \cdot \nu'_m = 0,568 \cdot c \neq c$;
- 2) средние значения тоже неоднозначны: $\langle \nu \rangle \cdot \langle \lambda \rangle = 1,419 \cdot c \neq c$, а $\langle E_\gamma \rangle \neq \langle E \rangle$;
- 3) медиана – единственная из рассмотренных характеристик, не зависящая от выбора шкалы: $\lambda_1 \cdot \nu_1 = c$;
- 4) логарифмическая шкала ($\ln \lambda$ или $\ln \nu$) устраняет неоднозначность: оба представления дают один и тот же максимум, т.к. логарифмическое преобразование линейно по логарифму;

5) планковская кривая очень широкая: относительная дисперсия длин волн $\delta\lambda = \sigma/\langle\lambda\rangle \approx 92\%$, что делает само понятие «пика» весьма условным.

Говорить о максимуме можно – математически он существует. Но физически он ничего особенного не выделяет, потому что кривая вблизи максимума практически плоская, интенсивность в широком диапазоне вокруг пика отличается незначительно, и смещение максимума при изменении шкалы происходит внутри этого широкого диапазона. Закон смещения Вина создает иллюзию точности – называет конкретную максимальную длину волны. Но сама кривая настолько широкая, что эта точность не имеет физического смысла. Медиана и логарифмическая шкала честнее именно потому, что не претендуют на выделение несуществующей «острой вершины» (логарифм делает растяжение равномерным, медиана вообще не зависит от того, как растянута шкала).

Итак, положение максимума спектральной плотности излучения абсолютно черного тела зависит от того, по какой шкале построен график – длин волн или частот. Остановимся подробнее на том, что на самом деле измеряет спектрометр. Спектрометр измеряет мощность (или число фотонов), попадающую в конкретный канал детектора за единицу времени. Канал соответствует либо узкому интервалу длин волн $\Delta\lambda$, либо узкому интервалу частот $\Delta\nu$. И вот в чем суть: эти два случая физически разные измерения, а не просто разные оси графика. Расхождение возникает из-за нелинейной связи между интервалами: $\Delta\nu = (c/\lambda^2)\Delta\lambda$. Т.е. одинаковый интервал по частоте соответствует разному интервалу по длине волны в разных частях спектра. Прибор, нарезающий спектр равными кусочками по $\Delta\lambda$, буквально считает разное по сравнению с прибором, нарезающим по $\Delta\nu$. В табл.2 показаны примеры таких приборов.

ТАБЛИЦА 2. Зависимость показаний спектрометра от принципа действия прибора

Тип прибора	Что нарезает	Что показывает
Дифракционный спектрометр	равные $\Delta\lambda$	u_λ – максимум при 500 нм (для Солнца)
Гетеродинный / радиоприемник	равные $\Delta\nu$	u_ν – максимум при 879 нм (для Солнца)
Фотонный счетчик	фотоны на бин	другой максимум

Спектрометры тоже не нейтральны – конструкция прибора определяет, в каких единицах он «нарезает» спектр. Рассмотрим три принципиально разных случая:

1) дифракционная решетка: угол дифракции зависит от λ напрямую, прибор нарезает равные $\Delta\lambda$, показывает u_λ ;

2) интерферометр Фабри-Перо: резонансное условие через частоту, прибор нарезает равные $\Delta\nu$, показывает u_ν ;

3) фурье-спектрометр (FTIR): фурье-преобразование по пути разности хода дает спектр в естественной шкале частот (обратных сантиметрах), показывает u_ν .

Два спектрометра, смотрящие на одно и то же излучение, дадут разное положение максимума – не из-за ошибки, а из-за природы измерения. Спектр – это не свойство излучения само по себе. Это результат взаимодействия излучения с измерительным прибором или детектором. Никакого «истинного» спектра не существует. Что реально существует физически? Фотоны. Каждый фотон имеет конкретную энергию $E = h\nu$. Это дискретная, счетная сущность. Никакого «спектра» у потока фотонов самого по себе нет – есть просто распределение энергий фотонов, это интерпретация, которую строит прибор или исследователь на основе регистрации единичных событий. Спектр возникает, когда мы задаем вопрос:

- «сколько энергии в интервале $\Delta\lambda$?» – получаем u_λ ;
- «сколько энергии в интервале $\Delta\nu$?» – получаем u_ν ;
- «сколько фотонов в интервале $\Delta\lambda$?» – третий, еще один спектр.

Это как спросить «какой истинный рост людей в городе» – зависит от того, строите ли вы гистограмму с шагом 1 см или 5 см, в сантиметрах или дюймах. Вопрос «какой истинный спектр» некорректен так же, как вопрос «какова истинная длина палки» без указания системы единиц. Физически реальны только фотоны и их энергии. Все остальное – способ представления, зависящий от измерительной процедуры.

Неоднозначность закона Вина – это не математический курьез и не проблема обозначений. Это отражение реального факта: разные приборы измеряют разные физические величины, и у каждой из них свой максимум.

Именно поэтому в статье [1] сделан важный вывод, что логарифмическая шкала или медиана – более фундаментальные характеристики: они не зависят от того, какой прибор вы используете. Медиана особенно практична: она отвечает на вопрос «на какой длине волны половина мощности выше, половина ниже» – и этот ответ одинаков независимо от прибора.

Список используемых источников

1. Pavlov F. F. Selected Topics in Quantum Optics: Ambiguity of Wien's Displacement Law // Journal of Thermophysics and Heat Transfer. 2026. Vol. 40, N 2. P. 545-549. DOI: doi/abs/10.2514/1.T7253.
2. Павлов Ф. Ф. Избранные вопросы квантовой оптики: неоднозначность закона смещения Вина // 65-я научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава, научных работников и аспирантов (НТК ППС 2025): Сборник научных статей. В 3 т., Санкт-Петербург, 17–21 февраля 2025 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, 2025. С. 183-190. EDN UUSQIX.
3. Матвеев А. Н. Оптика. М. Высш. шк., 1985, 351 с.
4. Jonathan M. Marr, Francis P. Wilkin. A better presentation of Planck's radiation law // Am. J. Phys. 2012. 80. p. 399-405. arXiv:1109.3822.

THE WIEN'S DISPLACEMENT LAW IN AN ASTROPHYSICAL CONTEXT: WHICH MAXIMUM DO WE OBSERVE?

Pavlov F.

The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

This article examines the well-known ambiguity of the Wien's displacement law, which stems from the fact that the position of the maximum spectral density of blackbody radiation depends on the choice of scale (wavelengths or frequencies). It is shown that this discrepancy is not a mathematical paradox, but rather reflects physically different methods of measuring the spectrum. Using the Sun ($T = 5800$ K) as an example, it is demonstrated that the maxima in the λ and ν scales yield significantly different values (500 nm and 879 nm) and cannot be reconciled even using average photon energies. It is established that the median and logarithmic scales are the only characteristics free from this ambiguity. Particular attention is paid to the fact that spectrometers with different operating principles «cut» the spectrum according to different laws ($\Delta\lambda$ or $\Delta\nu$) and therefore consistently show different maxima for the same radiation.

Key words: *Wien's displacement law, Planck's formula, spectral density of radiation, spectrometer*

УДК 531.5
ГРНТИ 29.05.09**ВЛИЯНИЕ НЕОДНОРОДНОСТИ ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ
ЗЕМЛИ НА ДВИЖЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МАЯТНИКА****Ф. Ф. Павлов, В. Б. Федюшин**

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Настоящая статья посвящена аналитическому решению и детальному анализу фундаментальной задачи классической механики с учетом закона всемирного тяготения Ньютона: задача о колебаниях математического маятника произвольной амплитуды, где исследуется отличие периода математического маятника от результата, полученного в приближении постоянного ускорения свободного падения. Также рассматривается задача о нахождении начальной критической скорости, которую необходимо сообщить материальной точке в нижнем положении маятника в горизонтальном направлении, чтобы при заданном угле отклонения сила натяжения нити обратилась в ноль. Материал представлен в виде технической заметки для студентов, специализирующихся в области аналитической и небесной механики.

закон всемирного тяготения, ускорение свободного падения, математический маятник, период, сила натяжения, сила тяжести, гравитационное поле

В отличие от обычных учебных программ, эта статья делает акцент на решение нетривиальных задач, которые обычно не рассматриваются в базовых учебниках. Ее задача – показать читателю более глубокий взгляд на физику, раскрыть взаимосвязь фундаментальных принципов в, на первый взгляд, знакомых проблемах. Представленные примеры не только обогащают стандартный курс, но и показывают, насколько результативным может быть сочетание разных методов из физики и математики.

I. Задача о нахождении периода математического маятника в однородном и неоднородном поле силы тяжести.

Вначале напомним, как решается задача в однородном поле тяжести.

Пусть плоский математический маятник, представляющий собой материальную точку массы m , подвешенную на легкой нерастяжимой нити длиной l , совершает в вертикальной плоскости колебательное движение (см. рис. 1а)) в однородном поле тяжести с постоянным ускорением свободного падения $g_0 = G \frac{M}{R^2} = 9,8 \text{ м/с}^2$, где G – гравитационная постоянная, M и R – масса и радиус Земли.

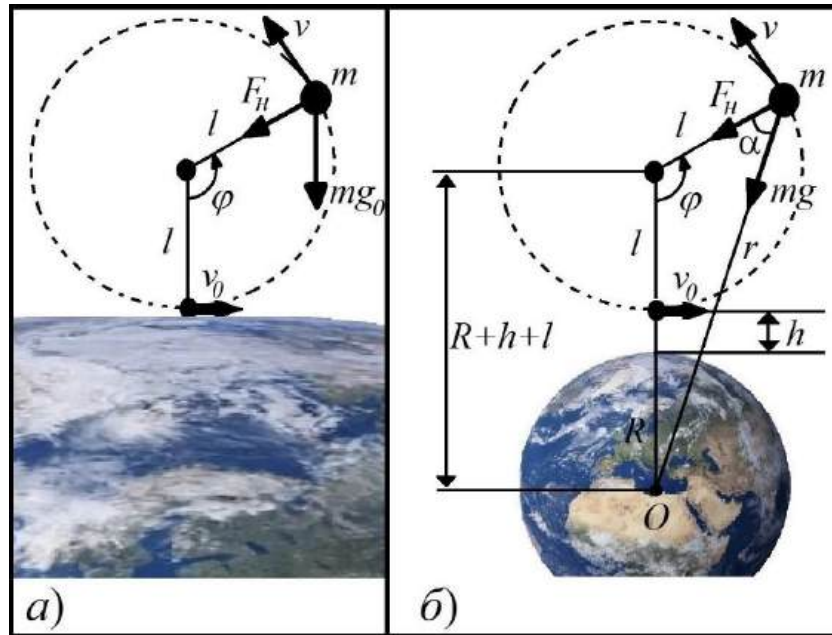


Рис. 1. а) математический маятник в однородном поле тяжести; б) математический маятник в неоднородном поле тяжести

Используя теорему о изменении кинетической энергии

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{ml^2\omega^2}{2} = mg_0l(\cos\varphi - \cos\varphi_m),$$

найдем угловую скорость ω

$$\omega = \dot{\varphi} = \frac{d\varphi}{dt} = \sqrt{\frac{2g_0}{l}} \sqrt{\cos\varphi - \cos\varphi_m},$$

где φ – угол отклонения нити от вертикали, φ_m – максимальный угол отклонения (амплитуда), $v = l\omega = l\dot{\varphi}$ – скорость.

Тогда путем разделения переменных можно получить элементарное время dt :

$$dt = \sqrt{\frac{l}{2g_0}} \frac{d\varphi}{\sqrt{\cos\varphi - \cos\varphi_m}} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{l}{g_0}} \frac{d\varphi}{\sqrt{k^2 - \sin^2(\varphi/2)}},$$

где введено обозначение $k = \sin(\varphi_m/2) < 1$.

Период математического маятника будет равен удвоенному времени

$$T = 2t = \sqrt{\frac{l}{g_0}} \int_{-\varphi_m}^{\varphi_m} \frac{d\varphi}{\sqrt{k^2 - \sin^2(\varphi/2)}} = 2 \sqrt{\frac{l}{g_0}} \int_0^{\varphi_m} \frac{d\varphi}{\sqrt{k^2 - \sin^2(\varphi/2)}}. \quad (1)$$

Делая замену переменных $\sin(\xi) = (1/k) \cdot \sin(\varphi/2)$ в формуле (1) с учетом колебания маятника в пределах $-\varphi_m \leq \varphi \leq \varphi_m$ или $0 \leq \xi \leq \pi/2$, получим известное выражение для периода [1]

$$T = 4 \sqrt{\frac{l}{g_0}} \int_0^{\pi/2} \frac{d\xi}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 \xi}} = 4 \sqrt{\frac{l}{g_0}} K(k), \quad (2)$$

где $K(k) = \int_0^{\pi/2} \frac{d\varphi}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 \xi}}$ – полный нормальный эллиптический интеграл Лежандра 1-го рода [2].

Для малых колебаний при $k = \sin(\varphi_m/2) \approx \varphi_m/2 \ll 1$ период с точностью до членов второго порядка будет равен

$$\begin{aligned} T &= 4 \sqrt{\frac{l}{g_0}} K(k) = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g_0}} \left(1 + \frac{1}{4} k^2 + \frac{9}{64} k^4 + O(k^6) \right) \approx \\ &\approx 2\pi \sqrt{\frac{l}{g_0}} \left(1 + \frac{1}{16} \varphi_m^2 + \frac{9}{1024} \varphi_m^4 + O(\varphi_m^6) \right). \end{aligned} \quad (3)$$

Формула (3) для минимального периода $2\pi \sqrt{\frac{l}{g_0}}$ является известной формулой Гюйгенса [3]. Когда математический маятник колеблется под небольшим углом, его период не зависит от амплитуды – это свойство называется изохронностью. При небольших угловых амплитудах φ_m зависимость периода от амплитуды практически незаметна. Например, при амплитуде $\varphi_m = 30\%$ период колебаний превышает минимальный период всего на 2 %, а при амплитуде $\varphi_m = 90\%$ – примерно на 20 %.

Решим теперь задачу, когда математический маятник колеблется в неоднородном поле тяжести с ускорением $g = G \frac{M}{r^2}$ (см. рис. 1б)).

Аналогично используя теорему о изменении кинетической энергии

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{ml^2\omega^2}{2} = GmM \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_m} \right),$$

и заменяя $GM = g_0 R^2$, получим выражение для квадрата угловой скорости

$$\omega = \dot{\varphi} = \frac{d\varphi}{dt} = \frac{R\sqrt{2g_0}}{l} \sqrt{\frac{1}{r} - \frac{1}{r_m}},$$

где r – расстояние от центра Земли до материальной точки; r_m – расстояние от центра Земли до материальной точки, соответствующее максимальному углу отклонения φ_m . При этом согласно теореме косинусов

$$r^2 = (R + h + l)^2 + l^2 - 2l(R + h + l)\cos\varphi = 4l(R + h + l)(\Delta + \sin^2(\varphi/2)),$$

$$r_m^2 = (R + h + l)^2 + l^2 - 2l(R + h + l)\cos\varphi_m = 4l(R + h + l)(\Delta + \sin^2(\varphi_m/2)), \Delta = \frac{(R+h)^2}{4l(R+h+l)},$$

где h – расстояние от нижней точки маятника в вертикальном положении до поверхности Земли (см. рис. 1б)).

Путем разделения переменных получаем элементарное время dt :

$$dt = \frac{l}{R\sqrt{2g_0}} \frac{d\varphi}{\sqrt{\frac{1}{r} - \frac{1}{r_m}}}.$$

Тогда период математического маятника будет равен

$$T = 2t = \frac{4l\sqrt{R+h}}{R\sqrt{2g_0}\Delta^{1/4}} \cdot \int_0^{\varphi_m} \frac{d\varphi}{\sqrt{\frac{1}{\sqrt{\Delta + \sin^2(\varphi/2)}} - \frac{1}{\sqrt{\Delta + k^2}}}} =$$

$$= \frac{4l\sqrt{R+h}}{R\sqrt{2g_0}\Delta^{1/4}} \cdot \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{2k \cos \xi d\xi}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 \xi} \cdot \sqrt{\frac{1}{\sqrt{\Delta + k^2 \sin^2 \xi}} - \frac{1}{\sqrt{\Delta + k^2}}}}. \quad (4)$$

Для малых колебаний при $k = \sin(\varphi_m/2) \approx \varphi_m/2 \ll 1$ интеграл с точностью до членов первого порядка будет равен $\sqrt{2}\pi\Delta^{3/4} \left(1 + \frac{1}{4}k^2 + O(k^4)\right)$ и выражение для периода примет вид:

$$T = \frac{2\pi\sqrt{l}(R+h)^{3/2}}{R\sqrt{g_0}\sqrt{R+h+l}} \left(1 + \frac{1}{4}k^2 + O(k^4)\right). \quad (5)$$

Проанализируем данное выражение для малых высот $h \rightarrow 0$, когда нижняя точка маятника в вертикальном положении проходит вблизи поверхности Земли, и рассмотрим отдельно два предельных случая: малую и большую длину нити l по сравнению с радиусом Земли R .

1. Рассмотрим случай когда длина нерастяжимой нити много меньше радиуса Земли $l/R \ll 1$. Тогда, как нетрудно убедиться из выражения (5),

пренебрегая вкладами l/R , период колебаний будет в точности равен формуле Гюйгенса (3) $T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g_0}}$, приведенной нами выше.

2. Рассмотрим случай, когда длина нити много больше радиуса Земли $R/l \ll 1$. Тогда, пренебрегая вкладами R/l , период колебаний будет равен

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{R}{g_0}} \left(1 + \frac{1}{4}k^2\right) \approx 2\pi \sqrt{\frac{R}{g_0}} = 84,4 \text{ мин.} \quad (6)$$

Остановимся на этом случае отдельно. Такой маятник закреплен бесконечно далеко, а материальная точка массы m находится вблизи уровня Земли. Его колебания возникают исключительно из-за неоднородности земного тяготения. При боковом смещении груза ускорение g меняет направление (а не направлено строго вниз как случае 1), в то время как нить остается строго вертикальной из-за огромной удаленности точки подвеса. Угол отклонения ускорения g относительно нити здесь соответствует углу отклонения нити от вертикали для случая 1 в обычном маятнике длиной в радиус Земли. Период равен $T = 84$ мин. как у спутника на низкой орбите или у тела, падающего через тоннель сквозь Землю. Это не обычные маятниковые колебания, а проявление эквивалентности движения в радиальном гравитационном поле движению по орбите с малой амплитудой.

II. Задача о нахождении начальной критической скорости, которую необходимо сообщить материальной точке в нижнем положении маятника в горизонтальном направлении, чтобы при заданном угле отклонения сила натяжения нити обратилась в ноль.

Решим задачу в однородном поле тяжести.

Из закона сохранения полной механической энергии

$$\frac{mv_0^2}{2} = \frac{mv^2}{2} + mg_0l(1 - \cos \varphi),$$

находим квадрат скорости $v^2 = v_0^2 - 2g_0l(1 - \cos \varphi)$, который подставляя во II закон Ньютона $F_H - mg_0 \cos \varphi = \frac{mv^2}{l}$ получим выражение для силы натяжения нити в однородном поле тяжести

$$F_H = \frac{mv_0^2}{l} - mg_0(2 - 3 \cos \varphi). \quad (7)$$

Область допустимых значений угла φ при $F_H = 0$ находим из условия $v^2 \geq 0$ или $v_0^2 = g_0l(2 - 3 \cos \varphi) \geq 2g_0l(1 - \cos \varphi)$, откуда находим

$\cos \varphi \leq 0$ или $\varphi \geq \frac{\pi}{2}$. Максимальное допустимое значение угла φ при $F_H = 0$ достигается при $\varphi = \pi$ и $v_0 = \sqrt{5g_0l}$.

Таким образом можно сделать вывод, что сила натяжения нити в однородном поле тяжести обращается в ноль $F_H = 0$ при скорости

$$v_0 = \sqrt{g_0l(2 - 3 \cos \varphi)} \quad (8)$$

где область допустимых значений угла φ составляет $\frac{\pi}{2} \leq \varphi \leq \pi$.

Решим задачу в неоднородном поле тяжести.

Из закона сохранения полной механической энергии

$$\frac{mv_0^2}{2} - \frac{mg_0R^2}{R+h} = \frac{mv^2}{2} - \frac{mg_0R^2}{r},$$

находим квадрат скорости $v^2 = v_0^2 + 2g_0R^2 \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{R+h} \right)$, который подставляя во II закон Ньютона $F_H + mg \cos \alpha = \frac{mv^2}{l}$ получим выражение для силы натяжения нити

$$F_H = \frac{mv_0^2}{l} - \frac{2mg_0R^2}{(R+h)l} - mg_0R^2 \frac{3l(R+h+l) \cos \varphi - 2(R+h+l)^2 - l^2}{l[(R+h+l)^2 + l^2 - 2l(R+h+l) \cos \varphi]^{3/2}}. \quad (9)$$

Аналогично предыдущему случаю, можно сделать вывод, что сила натяжения нити в неоднородном поле тяжести обращается в ноль $F_H = 0$ при скорости

$$v_0 = \sqrt{\frac{2g_0R^2}{R+h} + g_0R^2 \frac{3l(R+h+l) \cos \varphi - 2(R+h+l)^2 - l^2}{[(R+h+l)^2 + l^2 - 2l(R+h+l) \cos \varphi]^{3/2}}}, \quad (10)$$

где область допустимых значений угла φ составляет

$$\arccos\left(\frac{l}{R+h+l}\right) \leq \varphi \leq \frac{3\pi}{2} - \arccos\left(\frac{l}{R+h+l}\right).$$

Можно показать, что при $h \ll R$ и $l \ll R$ формулы (9) и (10) переходят в формулы (7) и (8) соответственно.

В табл.1 приведены примеры аналитических выражений для квадрата скорости v_0^2 при некоторых значениях угла φ в однородном и неоднородном поле тяжести.

ТАБЛИЦА 1. Выражение для квадрата скорости v_0^2 в зависимости от угла φ в однородном и неоднородном поле тяжести

φ	Квадрат скорости v_0^2	
	в неоднородном поле	в однородном поле ($h \ll R, l \ll R$)
$\frac{\pi}{2}$	$\frac{2g_0R^2}{R+h} - g_0R^2 \frac{2(R+h+l)^2 + l^2}{[(R+h+l)^2 + l^2]^{3/2}}$	$2g_0l$
$\frac{2\pi}{3}$	$\frac{2g_0R^2}{R+h} -$ $-g_0R^2 \frac{2(R+h+l)^2 + l^2 + \frac{3}{2}l(R+h+l)}{[(R+h+l)^2 + l^2 + l(R+h+l)]^{3/2}}$	$\frac{7}{2}g_0l$
$\frac{5\pi}{6}$	$\frac{2g_0R^2}{R+h} -$ $-g_0R^2 \frac{2(R+h+l)^2 + l^2 + \frac{3\sqrt{3}}{2}l(R+h+l)}{[(R+h+l)^2 + l^2 + \sqrt{3}l(R+h+l)]^{3/2}}$	$\left(2 + \frac{3\sqrt{3}}{2}\right)g_0l$
π	$\frac{g_0lR^2(5R+5h+8l)}{(R+h)(R+h+2l)^2}$	$5g_0l$

В заключение можно сказать, что представленные задачи, несмотря на свою стандартность для студентов физических факультетов, были намеренно включены в работу. Это сделано для создания целостного и логически связного изложения. Такой подход обеспечивает полноту методического материала и позволяет выстроить единую, самодостаточную систему объяснений, что важно для общей стройности и понятности физических явлений.

Список используемых источников

1. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика: Учеб. пособие. В 10-ти т. Т. 1. Механика. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988, 216 с.
2. Двайт Г. Б. Таблицы интегралов и другие математические формулы. М.: Наука, 1973, 228 с.
3. Горбатый И. Зависимость периода колебаний маятника от амплитуды. Квант. 2005. № 2. С. 27-29.

**INFLUENCE OF THE NON-UNIFORMITY OF THE EARTH'S GRAVITATIONAL
FIELD ON THE MOTION OF A MATHEMATICAL PENDULUM**

Pavlov F., Fedushin V.

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

This paper presents an analytical solution and a detailed analysis of a fundamental problem in classical mechanics under Newton's law of universal gravitation: the problem of oscillations of a simple pendulum with arbitrary amplitude. The study focuses on the deviation of the pendulum's period from the result obtained under the approximation of a constant gravitational acceleration. Additionally, the problem of determining the critical initial velocity is addressed. This velocity must be imparted to the point mass at the pendulum's lowest point in the horizontal direction, such that at a given deflection angle, the tension force in the string becomes zero. The material is presented as a technical note intended for students specializing in analytical and celestial mechanics.

Key words: law of universal gravitation, acceleration due to gravity, simple pendulum, period, tension force, force of gravity, gravitational field

УДК 621.391

ГРНТИ 49.33.29

**РАСПРЕДЕЛЕНИЕ И ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ДАННЫХ В ТРАКТАХ
И КАНАЛАХ СИСТЕМЫ СВЯЗИ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ****В. В. Сазонов**

Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного

В статье рассматриваются процессы распределения и преобразования данных в трактах и каналах системы связи специального назначения в контексте функционирования радиотехнических и телекоммуникационных средств доставки данных. Актуальность исследования обусловлена применением разнородных каналов связи, транзитных узлов, средств обработки и технических средств передачи данных, что требует согласованного использования ресурсов доставки. Объектом рассмотрения являются данные, представляющие собой формализованную форму представления информации и используемые в процессах распределения, преобразования, передачи, обработки и восстановления техническими средствами системы связи. В работе уточняется содержание распределения данных как процесса назначения сообщений, блоков и потоков данных трактам, каналам, режимам передачи и ресурсам обработки. Преобразование данных рассматривается как процесс изменения структуры, формата и способа представления данных, обеспечивающий их пригодность к прохождению через выбранные элементы тракта, контролю, восстановлению и выдаче получателю. Показано, что эффективность доставки данных определяется согласованностью процессов распределения и преобразования на передающей стороне, в транзитных узлах и на приемной стороне при обеспечении требуемых показателей качества доставки в трактах и каналах связи.

распределение данных, преобразование данных, тракт передачи данных, канал передачи данных, доставка данных, транзитный узел, радиотехнические средства связи, система связи специального назначения, распределение ресурсов

Известно [1, 2], что современные системы связи специального назначения представляют собой территориально распределенную совокупность разнородных трактов и каналов передачи данных, отличающихся составом средств связи, условиями применения и характеристиками функционирования. При организации распределенных полевых подвижных пунктов управления связность обеспечивается совместным использованием ресурсов транспортной сети связи, спутниковых систем связи, сетей связи общего пользования и радиосредств.

В таких условиях перемещение потоков данных осуществляется не по единственному заранее определенному пути, а с использованием множества доступных трактов и каналов связи [3–5], различающихся по пропускной способности, устойчивости, задержке, доступности и другим эксплуатационным характеристикам. Следовательно, эффективность доставки данных определяется не только наличием доступных трактов и каналов связи, но и порядком их использования, а также согласованностью условий прохождения данных с выбранной конфигурацией доставки.

В существующих подходах [1–5] доставка данных преимущественно рассматривается через маршрутизацию, выбор трактов и каналов передачи, управление режимами работы средств связи либо через отдельные процессы преобразования данных. В работе [6] показана значимость оптимального распределения информационных ресурсов в едином информационном пространстве с учетом требований своевременности, устойчивости и безопасности. Однако основное внимание в ней уделено размещению ресурсов по узлам хранения, а не согласованию распределения данных с их прохождением через тракты и каналы связи. В работе [7] преобразование раскрывается применительно к информации как объекту распределенной вычислительной обработки. Указанные положения требуют уточнения с позиции исследования данных как формализованного объекта распределения, преобразования и передачи в трактах и каналах системы связи специального назначения. Следовательно, сохраняется научно-методическая нестыковка: распределение ресурсов, маршрутизация и отдельные процессы преобразования данных рассматриваются преимущественно отдельно. Это не позволяет в полной мере определить место распределения и преобразования данных в процессе функционирования трактов и каналов, реализуемых радиотехническими и телекоммуникационными средствами системы связи специального назначения. Кроме того, недостаточно определенным остается характер их взаимосвязи на передающей стороне, в транзитных узлах и на приемной стороне.

Целью статьи является уточнение содержания понятий «распределение данных» и «преобразование данных» применительно к трактам и каналам системы связи специального назначения, а также установление их места, последовательности реализации и взаимосвязи в процессе обеспечения доставки данных от источника к получателю.

Распределение данных в настоящей статье предлагается понимать как процесс назначения данных трактам, каналам, режимам передачи и ресур-

сам обработки, определяющий порядок использования элементов системы связи при обеспечении доставки данных от источника к получателю. Объектами распределения являются сообщения, блоки или потоки данных. Объектами назначения распределения являются тракты, каналы, транзитные узлы, режимы передачи и ресурсы обработки.

Предлагаемое понимание позволяет разграничить распределение данных и маршрутизацию. Маршрутизация ориентирована на определение направления продвижения данных по сети связи и формирование маршрута передачи. Распределение данных рассматривается шире и связано с назначением данных элементам тракта доставки, определением режима передачи, использованием ресурсов обработки и согласованием условий их дальнейшего преобразования на передающей стороне, в транзитных узлах и на приемной стороне.

Преобразование данных в настоящей статье предлагается понимать как процесс изменения структуры, формата или способа представления данных, обеспечивающий согласование данных с условиями прохождения через выбранные тракты и каналы, а также выполнение процедур контроля, восстановления и выдачи получателю. Объектами преобразования являются сообщения, блоки или потоки данных, подвергаемые изменению в процессе доставки. Предлагаемое понимание разграничивает преобразование и распределение данных. Преобразование не определяет назначение данных элементам системы связи, а обеспечивает возможность их передачи, обработки и использования в уже выбранной конфигурации доставки на передающей стороне, в транзитных узлах и на приемной стороне.

Канал передачи данных характеризует отдельный участок передачи данных, обладающий определенными показателями пропускной способности, задержки и устойчивости. Тракт является более сложной категорией и может включать совокупность каналов, транзитных узлов, средств сопряжения, а также средств обработки и преобразования данных, обеспечивающих доставку данных от источника к получателю.

В системе связи специального назначения данные редко проходят через один однородный канал. В процессе доставки могут последовательно или параллельно использоваться каналы связи, реализованные на основе проводных, радиорелейных, спутниковых, беспроводных широкополосных, волоконно-оптических и иных технологий передачи. Наличие транзитных узлов обуславливает возможность повторного распределения данных между элементами тракта, промежуточного согласования форматов представления

данных, контроля состояния доставки данных и восстановления нарушенных фрагментов данных.

Поэтому тракт в контексте распределения и преобразования данных следует рассматривать как функциональную совокупность элементов системы связи, в пределах которой данные распределяются между доступными трактами, каналами, режимами передачи и ресурсами обработки, подвергаются преобразованию и контролю, а при необходимости – повторному распределению в процессе доставки от источника к получателю. Такая трактовка отличает тракт от отдельного канала и от маршрута: канал описывает участок передачи, маршрут – последовательность продвижения данных, а тракт – организованную среду доставки, распределения и преобразования данных.

Распределение и преобразование воздействуют на разные стороны функционирования тракта. Распределение связано с использованием доступных трактов, каналов, режимов передачи и ресурсов обработки, загрузкой каналов, своевременностью доставки и возможностью резервирования. Преобразование связано с обеспечением достоверности данных, контролем их целостности, обнаружением и устранением ошибок, восстановлением данных и обеспечением их пригодности к выдаче получателю (таблица 1).

ТАБЛИЦА 1. Место распределения и преобразования данных в трактах и каналах системы связи специального назначения

Участок тракта	Распределение данных	Преобразование данных	Результат
Передающая сторона	Назначение сообщений, блоков и потоков данных трактам, каналам, режимам передачи и ресурсам обработки	Подготовка, преобразование форматов, кодирование и согласование данных с условиями передачи	Готовность данных к передаче
Транзитные узлы	Повторное распределение данных между элементами тракта, резервирование и обход отказов	Промежуточное согласование форматов представления данных, контроль прохождения данных, буферизация и восстановление данных	Обеспечение прохождения данных
Приемная сторона	Назначение данных процедурам обработки, выдачи, повторного запроса либо повторной доставки	Обратное преобразование данных, контроль целостности, объединение и восстановление данных	Пригодность данных к выдаче получателю

В зарубежных исследованиях близкие задачи рассматриваются в рамках подходов *traffic engineering* и *multipath transmission*, ориентированных на управление потоками, эффективное использование сетевых ресурсов и одновременное применение нескольких путей передачи [8, 9]. Для систем связи специального назначения эти подходы полезны как аналоги, однако не учитывают в полном объеме преобразование данных, контроль, восстановление, обработку на приемной стороне, режимы работы средств связи, а также ограничения по устойчивости, безопасности и скрытности.

Эффективность функционирования тракта целесообразно оценивать по степени достижения заданных показателей качества доставки данных от источника к получателю. Даже тракт с высокой пропускной способностью не обеспечивает требуемый результат, если данные не согласованы с его интерфейсами, форматами и режимами контроля. В то же время эффективное кодирование или восстановление не компенсирует ошибочное назначение данных перегруженным, недоступным или неустойчивым каналам.

Эффективность функционирования трата целесообразно оценивать по степени достижения заданных показателей качества доставки. Свойства системы связи характеризуют потенциальные возможности трактов и каналов, показатели качества фиксируют результат доставки, а эффективность показывает, насколько выбранные способы распределения и преобразования обеспечивают требуемую доставку в заданных условиях.

Таким образом, распределение и преобразование данных являются самостоятельными, но взаимосвязанными процессами функционирования трактов и каналов системы связи специального назначения. Распределение определяет назначение данных трактам, каналам, режимам передачи и ресурсам обработки, а преобразование обеспечивает их пригодность к прохождению через выбранные элементы доставки, включая контроль, восстановление и выдачу получателю на приемной стороне. Эффективность функционирования тракта определяется согласованностью указанных процессов при достижении заданных показателей качества доставки данных от источника к получателю.

Список используемых источников

1. Иванов В. Г. Теория и практика построения и обеспечения функционирования системы связи специального назначения с учетом технологического развития и опытов вооруженных конфликтов / В. Г. Иванов. М.: Красная звезда, 2025. 304 с. ISBN 978-5-88727-339-6.

2. Зубакин В. В., Назаров Д. К., Сазонов В. В., Сальников А. С. Особенности информационно-технического взаимодействия элементов сетей связи и передачи данных

специального назначения // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2023): XII Международная научно-техническая и научно-методическая конференция: сб. науч. ст. в 4-х т., Санкт-Петербург, 28 февраля – 01 марта 2023 г. – СПб: СПбГУТ, 2023. С. 771-774. EDN RZQRTQ.

3. Деньжонков К. А., Зубакин В. В., Калюка В. И. [и др.] Основы передачи данных / под ред. И. Б. Паращука. СПб.: ВАС, 2015. 216 с. EDN XGLSAL.

4. Чуднов А. М. Математические основы моделирования, анализа и синтеза систем / А. М. Чуднов. СПб.: ВАС, 2021. 193 с. EDN YKTFWD.

5. Сазонов В. В. Преобразования и передача данных в трактах и каналах системы связи специального назначения // 65-я научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава, научных работников и аспирантов (НТК ППС 2025): сб. науч. ст. в 3-х т., Санкт-Петербург, 17–21 февраля 2025 г. СПб.: СПбГУТ, 2025. С. 615–618. EDN LZJMBG.

6. Николаев В. В., Саенко И. Б. Оптимизация распределения информационных ресурсов в едином информационном пространстве // Труды учебных заведений связи. 2024. Т. 10, № 3. С. 87–103. DOI 10.31854/1813-324X-2024-10-3-87-103. EDN UFROMW.

7. Бушуев С. Н. Организация распределенного преобразования информации в информационно-технических системах. СПб.: ВАС, 1994. 226 с.

8. Awduche D., Malcolm J., Agogbua J., O'Dell M., McManus J. Requirements for Traffic Engineering Over MPLS. RFC 2702. IETF, 1999. URL: <http://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc2702> (дата обращения: 22.05.2026).

9. Ford A., Raiciu C., Handley M., Bonaventure O., Paasch C. TCP Extensions for Multipath Operation with Multiple Addresses. RFC 8684. IETF, 2020. URL: <http://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc8684> (дата обращения: 22.05.2026).

DATA DISTRIBUTION AND PROCESSING IN THE PATHWAYS AND CHANNELS OF SPECIAL-PURPOSE COMMUNICATIONS SYSTEMS

Sazonov V.

Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S. M. Budyonny

This article examines the processes of data distribution and transformation in the paths and channels of a specialised communications system, in the context of the operation of radio and telecommunications data delivery systems. The relevance of this research stems from the use of diverse communication channels, transit nodes, data processing systems and technical data transmission equipment, which necessitates the coordinated utilisation of delivery resources. The subject of consideration is data, which constitutes a formalised form of information representation and is used in the processes of distribution, transformation, transmission, processing and recovery by the technical means of the communication system. The paper clarifies the concept of data distribution as the process of assigning messages, blocks and data streams to paths, channels, transmission modes and processing resources. Data transformation is considered as the process of changing the structure, format and method of data representation, ensuring its suitability for passing through selected path elements, monitoring, recovery and delivery to the recipient. It is shown that the efficiency of data delivery is determined by the coordination of distribution and transformation processes on the transmitting side, at transit nodes and on the receiving side, whilst ensuring the required delivery quality metrics in communication paths and channels.

Key words: data distribution, data conversion, data transmission path, data transmission channel, data delivery, transit node, radio communication equipment, specialised communication system, resource allocation

УДК 621.396

ГРНТИ 47.05.09

ПОВЫШЕНИЕ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫМИ ВОЗДУШНЫМИ СУДАМИ В ЗАДАЧАХ ТРАНСПОРТНОЙ ЛОГИСТИКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕОРЕТИКО-ИГРОВОГО ПОДХОДА

В. С. Усс, В. Т. Хоанг

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Статья посвящена проблеме повышения помехоустойчивости систем управления беспилотными воздушными судами (БВС), применяемыми в транспортной логистике, в условиях воздействия электромагнитных помех различной природы. Показано, что эксплуатация БВС в городской среде, насыщенной источниками электромагнитных излучений, сопряжена с существенным риском деградации каналов управления и навигации. Особое внимание уделено угрозе со стороны интеллектуальных помехопостановщиков, способных адаптивно изменять стратегию подавления в реальном времени. Традиционные методы обеспечения помехоустойчивости (псевдослучайной перестройки рабочей частоты и расширения спектра псевдослучайной последовательностью) недостаточно эффективны в условиях воздействия интеллектуальных помех из-за фиксированности и предсказуемости используемых шаблонов. В качестве перспективного направления обосновано применение теоретико-игрового подхода к управлению частотными, пространственными и энергетическими ресурсами БВС. Рассмотрены преимущества данного подхода, включая возможность моделирования стратегического взаимодействия в условиях неполной информации на основе байесовского равновесия Нэша, а также интеграцию с многоагентным обучением с подкреплением. Сделан вывод о том, что теоретико-игровые методы позволяют существенно повысить адаптивность и помехозащищенность автономных логистических систем на базе БВС.

беспилотные воздушные суды (БВС), электромагнитные помехи (ЭМП), транспортная логистика, управление, теория игр, обучение с подкреплением

Современная транспортная логистика все больше использует беспилотные воздушные суды (БВС) для быстрой доставки и транспортировки грузов. Однако их эксплуатация в сложной электромагнитной среде промышленных районов или районов с плотной городской застройкой неизбежно сопряжена с негативным воздействием электромагнитных помех (ЭМП) на системы управления и навигации. Так, в городской среде, насыщенной беспроводными устройствами (Wi-Fi, Bluetooth), при наличии высоковольтных ЛЭП, радаров аэропортов и т. п., помехи могут существенно снижать

качество каналов управления и навигации, что способно привести к невыполнению миссии доставки и потере груза.

Поскольку электромагнитные помехи могут быть различными по своей природе, для облегчения их классификации удобно пользоваться методом, основанным на спектральной плотности мощности (рис. 1), предложенным Гири Д. В. и Теше Ф. М. [1].

Также следует обратить внимание на развитие интеллектуальных источников помех [2], которые в руках злоумышленников могут приводить к перехвату наиболее ценных грузов и препятствовать безопасной логистике.

Перехват может осуществляться постановкой прицельных помех навигационной аппаратуре БВС, при которой он, потеряв ориентацию в пространстве, вынужден будет совершить посадку, спуфинг-атакой с подменой истинных координат спутниковой системы навигации, при которой БВС доставит груз в точку, определенную злоумышленником, а также непосредственным перехватом канала управления.

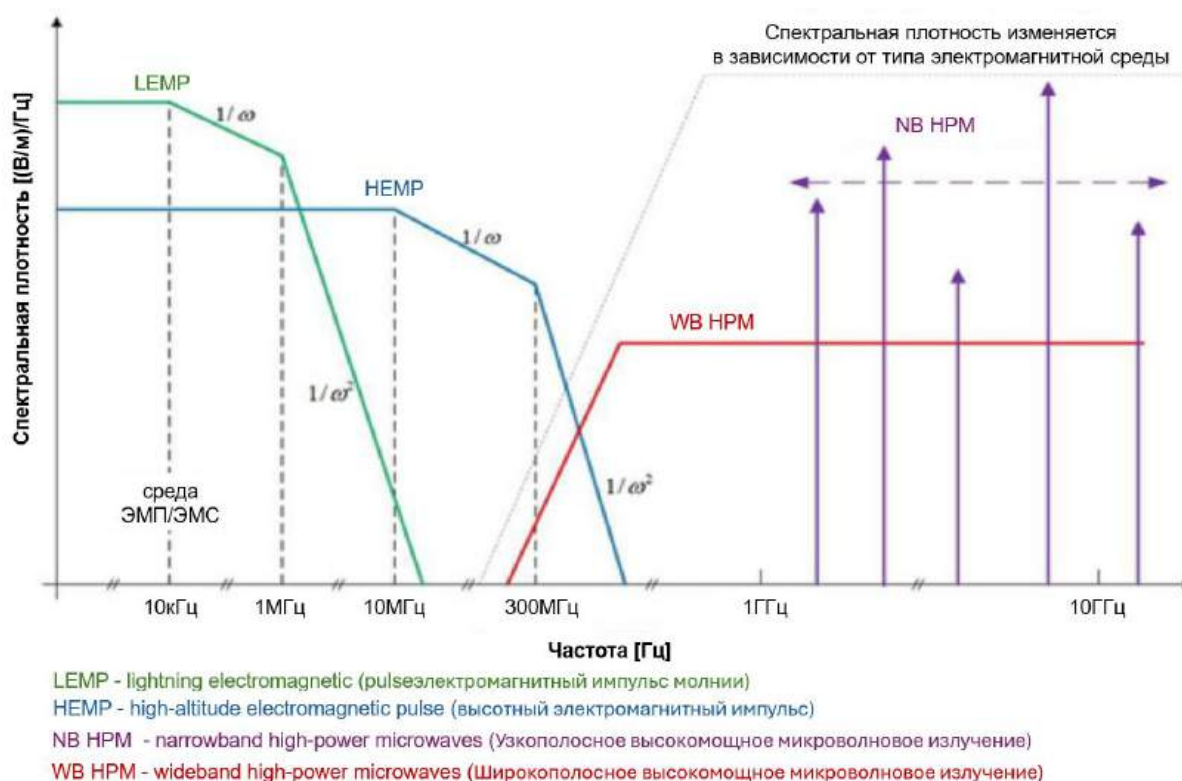


Рис. 1. Классификация электромагнитных помех, воздействующих на сигналы управления БВС по спектральной плотности

Для повышения помехоустойчивости каналов управления БВС хорошо зарекомендовали себя такие методы, как псевдослучайная перестройка ра-

бочей частоты (ППРЧ) и расширение спектра наложением на сигнал псевдослучайной последовательности (ПСП). Общим принципом этих методов является распределение энергии сигнала по широкому частотному спектру с целью избегания зашумленных участков, что обеспечивает базовую устойчивость связи. Однако, как показывает практика [3], данные методы недостаточно эффективны в сложных помеховых условиях, особенно в городской среде с динамичными, мощными и интеллектуальными источниками помех.

Наиболее актуальной проблемой является слабая адаптивность БВС к интеллектуальным помехам, то есть помехам, способным изменять стратегию в реальном времени на основе наблюдения за поведением объекта воздействия. Шаблоны частотной перестройки в ППРЧ или при использовании ПСП часто фиксированы или предсказуемы, поэтому интеллектуальный помехопостановщик может анализировать и подавлять именно используемые частоты, резко снижая эффективность связи [4].

В связи с этим возникает необходимость в применении новых, более интеллектуальных подходов к повышению помехозащищенности средств управления и навигации БВС, используемых в транспортной логистике. Одним из таких перспективных направлений следует рассматривать использование алгоритмов управления частотными, пространственными и энергетическими ресурсами, построенных на базе теории игр.

Теория игр в последние десятилетия продемонстрировала высокую эффективность не только для решения экономических и социальных задач, но и для ряда актуальных инженерных задач [5]. В частности, она широко используется для моделирования стратегического взаимодействия в беспроводных сетях связи – например, для распределения спектра частот, маршрутизации данных в сенсорных сетях или проектирования распределенных протоколов для сетей сотовой связи и интернета вещей (IoT).

Как известно, теория игр представляет собой раздел прикладной математики, изучающий поведение рациональных агентов («игроков») в ситуациях стратегического взаимодействия [6], при этом:

- каждый игрок выбирает действие (стратегию) для оптимизации своей функции выигрыша (полезности);
- итоговый результат для каждого игрока зависит не только от его собственного выбора, но и от выборов всех остальных игроков;
- агенты предполагаются рациональными, то есть стремящимися максимизировать свою выгоду на основе доступной информации.

На круговой диаграмме (рис. 2) систематизированы базовые типы игр, наиболее часто встречающиеся в литературе.



Рис. 2. Основные типы игр [7]

Применение методов теории игр в управлении БВС для транспортной логистики, особенно в условиях неполной информации, обладает рядом преимуществ по сравнению с традиционными подходами благодаря способности моделировать стратегические решения в условиях неопределенности [8-10].

Во-первых, данный подход эффективно справляется с неполной информацией путем применения байесовского равновесия Нэша, позволяя БВС прогнозировать поведение злоумышленников (источников интеллектуальных помех) на основе субъективных вероятностей, тем самым оптимизируя траекторию полета в сильно зашумленной помеховой обстановке, где данные о местоположении неточны.

Во-вторых, применение данного подхода способствует принятию оптимальных решений в антагонистических ситуациях путем моделирования взаимодействий между БВС и помехопостановщиком как некооперативных игр, что позволяет гибко распределять ресурсы логистической системы, минимизировать задержки доставки и повышать общую эффективность.

В-третьих, теоретико-игровой подход повышает надежность и безопасность автономных систем путем интеграции многоагентного обучения с подкреплением для противодействия неопределенностям (рис. 3), значительно превосходя традиционные линейные методы управления, лишенные стратегической адаптивности.

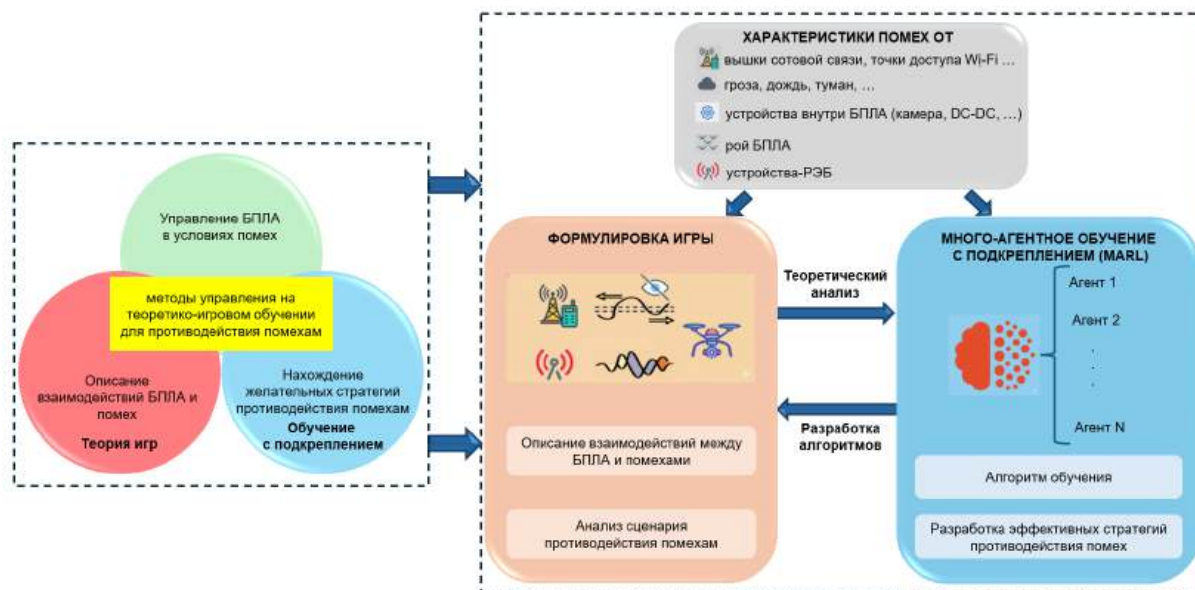


Рис. 3. Интеграция теории игр и много-агентного обучения с подкреплением в управлении БВС в условиях воздействий помех

Таким образом, применение теории игр позволяет не только преодолеть ограничения традиционных методов, но и открывает новые возможности для управления БВС в транспортной логистике, где неопределенность превращается в стратегическое преимущество, способствуя устойчивому развитию и технологическим инновациям в условиях возрастающей сложности электромагнитной обстановки.

Список используемых источников

1. Zhang Z.; Zhou Y.; Zhang Y.; Qian B. Strong Electromagnetic Interference and Protection in UAVs // Electronics 13. N 2. 2024. PP. 393. DOI: 10.3390/electronics13020393.
2. Pirayesh H., Zeng H. Jamming Attacks and Anti-Jamming Strategies in Wireless Networks: A Comprehensive Survey // IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol. 24. N 2. PP. 767-809, Second quarter 2022. DOI: 10.1109/COMST.2022.3159185.
3. Neelakshi R., Trisha P. Performance Analysis of DSSS and FHSS under Various Jamming Scenarios // Journal of Innovation and Advancement in Electronic Frontier, Volume 1 (Issue 1: June 2024). PP. 26-31. DOI:10.65525/jaief.v1i1.5.
4. Torrieri D. Principles of Spread-Spectrum Communication Systems // Springer International Publishing, 2018. P. 727. ISBN: 3319705687, 9783319705682.
5. Tushar W. et al. A Survey of Cyber-Physical Systems From a Game-Theoretic Perspective // IEEE Access, Vol. 11. PP. 9799-9834, 2023. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3239834.
6. Han Z.; Niyato D.; Saad W.; Baar T.; Hjrungnes A. Game Theory in Wireless and Communication Networks // Cambridge University Press 40 W. 20 St. New York, NY United States, 2012, p 554. ISBN: 978-0-521-19696-3.
7. Game Theory. URL: <https://sixsigmadsi.com/glossary/game-theory/> (дата обращения: 30.03.2026).

8. John C. Harsanyi. Games with Incomplete Information Played by «Bayesian» Players, I-III // Manage. Sci. 50, 12 Supplement (December 2004). PP. 1804-1817, 2004. DOI: 10.1287/mnsc.1040.0270

9. Tian M.; Yu S.; Liu L. et al. Evolutionary game decision-making method for high dynamic UAV swarm attack-defense considering uncertain factor influences // Complex Intell. Syst. 11, 345 (2025). DOI: 10.1007/s40747-025-01977-8.

10. Mkiramweni M. E.; Yang C.; Li J.; Zhang W. A Survey of Game Theory in Unmanned Aerial Vehicles Communications // IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol. 21, N 4, PP. 3386-3416, Fourth quarter 2019. DOI: 10.1109/COMST.2019.2919613.

ENHANCING JAMMING RESILIENCE OF UNMANNED AERIAL VEHICLE CONTROL SYSTEMS FOR TRANSPORT LOGISTICS APPLICATIONS USING A GAME-THEORETIC APPROACH

Uss V., Hoang V.

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

The paper addresses the problem of enhancing the jamming resilience of unmanned aerial vehicle (UAV) control systems employed in transport logistics under the impact of electromagnetic interference (EMI) of various origins. It is demonstrated that UAV operations in urban environments, which are densely saturated with electromagnetic emission sources, entail a substantial risk of degradation in command-and-control and navigation links. Attention is given to the threat posed by intelligent jammers capable of adaptively modifying their suppression strategy in real time. Conventional anti-jamming techniques – namely, frequency hopping spread spectrum (FHSS) and direct-sequence spread spectrum (DSSS) are shown to be insufficiently effective against intelligent jamming due to the deterministic and predictable nature of the patterns employed. As a promising research direction, the application of a game-theoretic approach to the management of spectral, spatial, and power resources of UAVs is substantiated. The advantages of this approach are discussed, including the capability to model strategic interaction under incomplete information based on Bayesian Nash equilibrium, as well as its integration with multi-agent reinforcement learning (MARL). It is concluded that game-theoretic methods can significantly enhance the adaptability and anti-jamming protection of autonomous UAV-based logistics systems.

Key words: *unmanned aerial vehicles (UAVs), electromagnetic interference (EMI), transport logistics, command and control, game theory, reinforcement learning*

УДК 621.396.67
ГРНТИ 47.45.29

СИНТЕЗ КОГНИТИВНОГО АЛГОРИТМА ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ МЕРЦАЮЩИХ ПОМЕХ НА ОСНОВЕ ТЕОРЕТИКО-ИГРОВОГО ПОДХОДА

А. А. Хренов

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Решается задача повышения помехоустойчивости радиоэлектронных систем при воздействии мерцающих помех. Классические градиентные алгоритмы адаптации теряют устойчивость при скачкообразном изменении ранга помеховой ковариационной матрицы, а методы непосредственного обращения обладают избыточной вычислительной сложностью. Для разрешения данного противоречия синтезирован когнитивный алгоритм управления пространственно-временной обработкой, базирующийся на теоретико-игровом подходе. Введен целевой функционал приемной системы, оптимизирующий компромисс между минимизацией среднего квадрата ошибки и вычислительной сложностью. Результаты имитационного моделирования подтверждают, что предложенный алгоритм обеспечивает автоматическую перестройку вычислительного ядра адекватно сигнально-помеховой обстановке. Данный подход гарантирует удержание равновесного состояния системы и непрерывное подавление помех.

линейная антенная решетка, мерцающие помехи, алгоритмы адаптации, когнитивный алгоритм

Введение

Современные радиотехнические устройства, зачастую, работают в сложных условиях радиоэлектронной обстановки, подвергаясь влиянию различного рода помех, в том числе и мерцающих. Для улучшения качества приема информации в системах применяются адаптивные антенные решетки (ААР) с различным числом антенных элементов [1, 2].

Однако зачастую алгоритмы адаптации не могут обеспечить компромисс между вычислительной сложностью и оптимальными параметрами сходимости. Классические градиентные алгоритмы адаптации теряют устойчивость при резком изменении сигнально-помеховой обстановки, а методы непосредственного обращения обладают избыточной вычислительной сложностью [3].

Для разрешения данного противоречия и, как следствие, повышения помехоустойчивости радиоэлектронных систем при воздействии мерцающих помех, был синтезирован когнитивный алгоритм управления пространственно-временной обработкой, базирующийся на математическом аппарате теоретико-игрового подхода [4].

Целью исследования является синтез когнитивного алгоритма пространственной обработки сигналов, позволяющий установить баланс между минимизацией среднего квадрата ошибки и вычислительной сложностью, в условиях воздействия мерцающих помех.

Для достижения указанной цели были определены следующие задачи:

1. Описание математического аппарата теоретико-игрового подхода и работы когнитивного алгоритма.
2. Разработка пространственно-временной модели сигнально-помеховой обстановки для линейной антенной решетки и синтез когнитивного алгоритма пространственной обработки сигналов.
3. Исследование динамической устойчивости и помехозащищенности алгоритма в условиях воздействия хаотических мерцающих помех.

Математический аппарат

Для начала приведем математическое описание теоретико-игрового подхода и работы когнитивного алгоритма. В качестве ААР рассматривается 8-элементная линейная эквидистантная антенная решетка $N = 8$. Математическая модель взаимодействия приемной системы и постановщика помех задается в виде игры (тройкой) $G = \langle K, \{S_i\}, \{u_i\} \rangle$, где $K = \{1, 2\}$ – множество игроков. S_1, S_2 – множества доступных стратегий. Для Игрока 1 (приемник с ААР и когнитивным алгоритмом) стратегией является выбор конкретного алгоритма фильтрации:

- Стратегия S_{11} (ресурсосберегающая): выбор градиентного ядра NLMS. Эта стратегия характеризуется минимальными вычислительными затратами $O(N)$, но подвержена риску срыва слежения.
- Стратегия S_{12} (сбалансированная): использование итерационного алгоритма RLS. Характеризуется средними затратами $O(N^2)$ и высокой скоростью сходимости.
- Стратегия S_{13} (подавление помехи): применение блочного алгоритма непосредственного обращения выборочной ковариационной матрицы (НОМ). Характеризуется высокой скоростью сходимости, более лучшими

показателями подавления мерцающих помех, чем RLS, но имеет высокую вычислительную сложность $O(N^3)$.

Для игрока 2 (постановщик помех) стратегией является выбор режима формирования помехового воздействия:

- Стратегия S_{21} (стационарное воздействие): постановщик непрерывно излучает помеховый сигнал с постоянными энергетическими и спектральными характеристиками. Не требует больших аппаратных затрат на создание помех.
- Стратегия S_{22} (асинхронное пространственно-распределенное воздействие): постановщиком формируются хаотические мерцающие помехи в виде последовательности импульсов со случайным периодом следования. Как правило, помехи такого рода создаются с нескольких независимых направлений. Не требует больших энергетических затрат.
- Стратегия S_{23} (синхронизированное пространственно-распределенное воздействие): с разных направлений постановщик формирует синхронизированные по времени мерцающие помехи в виде последовательности импульсов с одинаковым периодом следования, но с задержкой. Для реализации стратегии требуются большие аппаратные затраты на синхронизацию.

Функция выигрыша для приемной системы с когнитивным алгоритмом u_1 строится как взвешенная разность между качеством фильтрации (обратной величиной СКО) и затраченными ресурсами:

$$u_1(S_1, S_2) = \frac{\alpha}{E[|e(k)|^2] + \varepsilon} - \beta \cdot C(S_1),$$

где $e(k) = d(k) - w^H(k)x(k)$ – сигнал ошибки, $C(S_1)$ – вычислительная сложность выбранного алгоритма, α и β – весовые коэффициенты, ε – малая константа для предотвращения деления на ноль.

Целевая функция источника помех (Игрок 2) u_2 направлена на ухудшение качества связи:

$$u_2(S_1, S_2) = E[|e(k)|^2] - \gamma \cdot C(S_2),$$

где $E[|e(k)|^2]$ – нанесенный ущерб (рост ошибки), γ – весовой коэффициент затрат источника, $C(S_2)$ – энергетические/аппаратные затраты генератора на создание помехи.

Механизм адаптации когнитивного алгоритма представляет собой замкнутый цикл интеллектуального управления ресурсами, работающий в режиме реального времени. Он оценивает текущую дисперсию ошибки:

$\hat{f}(k) \approx \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} |e(k-m)|^2$ на скользящем окне. На основе динамики изменения $\hat{f}(k)$ когнитивный процессор идентифицирует текущую стратегию Игрока 2 (S_2). Далее алгоритм сопоставляет потерю качества связи со стоимостью вычислительных ресурсов и в зависимости от выбранного решения происходит мгновенное переключение математического аппарата (NLMS $\leftrightarrow$ RLS $\leftrightarrow$ NOM). Для предотвращения слишком частого переключения ядер при пограничных значениях СКО алгоритм выжидает заданное число тактов, проверяя, не является ли отсутствие сигнала в эфире частью стратегии и после подтверждения стабильности эфира система возвращается в энергоэффективное состояние, минимизируя штраф за вычислительную сложность.

Результаты моделирования

На рисунке 1 представлены моменты активности источников хаотических мерцающих помех в эфире. Три независимых генератора помех работают хаотично, накладываясь друг на друга.

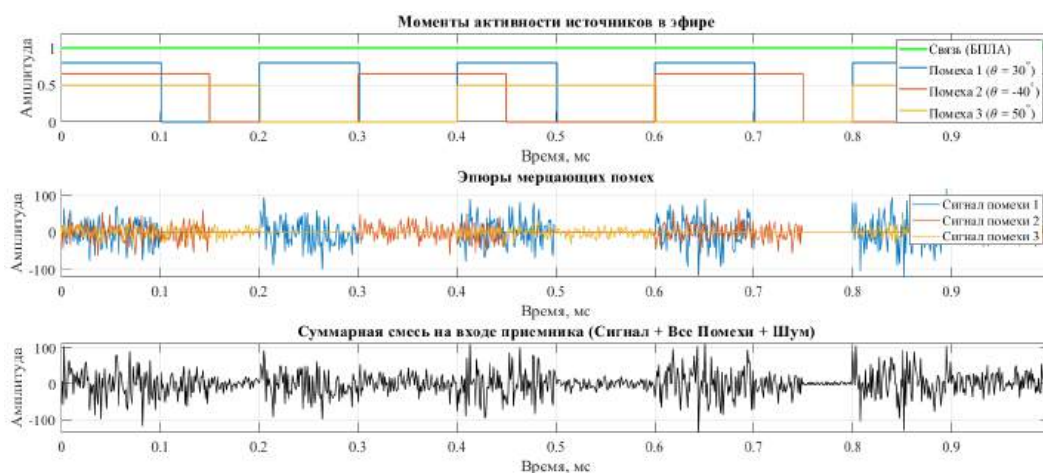


Рис. 1. Активность хаотических мерцающих помех в эфире

Результат работы когнитивного алгоритма представлен на рисунке 2.

Рассмотрим графики на рисунке 2. Верхний «сценарий эфира» демонстрирует сложную, асинхронную сигнально-помеховую обстановку. Ступенчатая линия показывает суммарное количество одновременно действующих помех в эфире (от 0 до 3) в каждый момент времени.

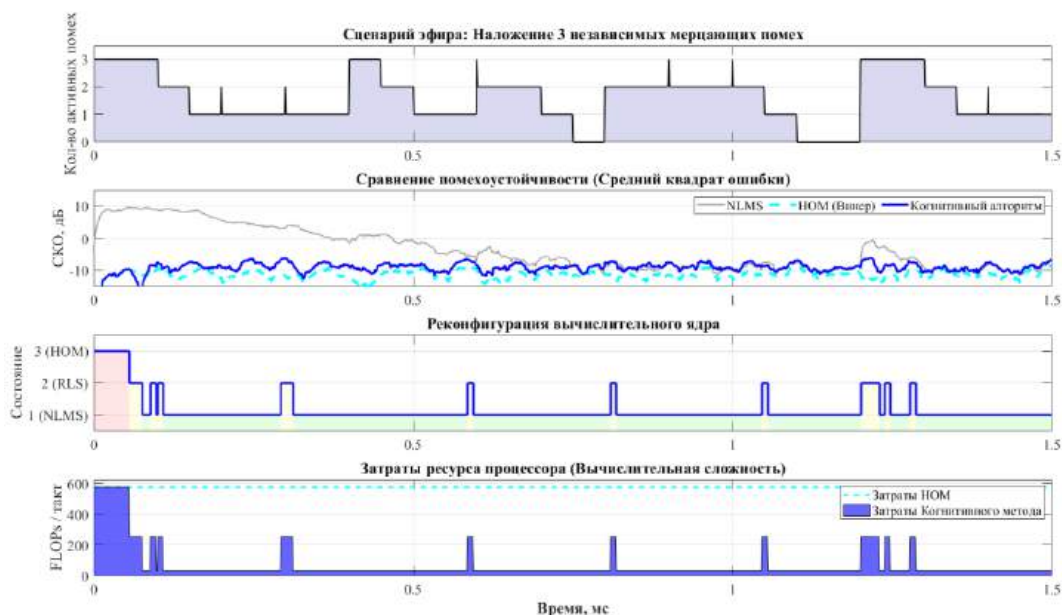


Рис. 2. Результат работы когнитивного алгоритма при воздействии хаотических мерцающих помех

На втором графике «сравнение помехоустойчивости (средний квадрат ошибки)» оценивается качество приема полезного сигнала. Серая кривая (NLMS): дает огромные всплески СКО при каждом изменении обстановки в эфире, что на практике означает потерю пакетов данных или обрыв связи. Голубым пунктиром отмечен эталонный метод (НОМ), который при подавлении помех обеспечивает минимальный средний квадрат ошибки. Синей линией показана работа когнитивного алгоритма, значения которого практически совпадают с эталонным методом.

На третьем графике представлен процесс реконфигурации вычислительного ядра когнитивного алгоритма, то есть результат выбора стратегии в каждый момент времени на основе изменения сигнально-помеховой обстановки.

На последнем графике показаны затраты ресурса процессора в ходе работы когнитивного алгоритма. Голубой пунктирной линией отмечены энергозатраты при использовании только эталонного метода на основе обращения выборочных матриц (НОМ). Синие области отражают фактические затраты когнитивного метода. Видно, что большую часть времени алгоритм использует малозатратные методы (NLMS или RLS) и лишь при сильном изменении сигнально-помеховой обстановки он применяет НОМ, что, в конечном счете, позволяет значительно сильно сэкономить энергоресурс системы.

Заключение

Таким образом, в ходе исследования был синтезирован когнитивный алгоритм пространственной обработки сигналов на основе теоретико-игрового подхода, позволяющий установить баланс между минимизацией среднего квадрата ошибки и вычислительной сложностью, в условиях воздействия мерцающих помех. Разработанная пространственно-временная модель сигнально-помеховой обстановки для линейной антенной решетки показала, что когнитивный алгоритм способен адаптивно подстраиваться под изменяющуюся радиоэлектронную обстановку, обеспечивая величину минимальной средней ошибки на уровне эталонного метода (НОМ).

Список используемых источников

1. Джиган В. И. Адаптивная фильтрация сигналов: теория и алгоритмы. Москва: Техносфера, 2013. 528 с.
2. Монзинго Р. А., Миллер Т. У. Адаптивные антенные решетки. Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1986 г. 448 с.
3. Van Trees H. L. Optimum Array Processing. P. IV of Detection, Estimation, and Modulation Theory. N.Y.: J.Wiley & Sons, Inc., 2002. 1470 p.
4. Мазалов В. В. Математическая теория игр и приложения: учебное пособие для вузов. Санкт-Петербург: Лань, 2021. 500 с.

Статья представлена научным руководителем, профессором кафедры РТ СПбГУТ, доктором технических наук, профессором Е. И. Глушанковым.

SYNTHESIS OF COGNITIVE ALGORITHM FOR SPATIAL SIGNAL PROCESSING UNDER FLICKERING INTERFERENCE USING A GAME- THEORETIC APPROACH

Khrenov A.

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

The problem of improving interference immunity of radio-electronic systems under flickering interference is addressed. Classical gradient-based adaptation algorithms lose stability when rank of interference covariance matrix changes abruptly, while direct inversion methods suffer from excessive computational complexity. To resolve this trade-off, a cognitive algorithm for spatio-temporal processing control has been synthesized, based on a game-theoretic approach. A target functional of the receiving system is introduced, optimizing compromise between minimizing mean square error and computational complexity. Simulation results confirm that proposed algorithm enables automatic reconfiguration of computational core in accordance with signal-and-interference environment. This approach guarantees maintaining system's equilibrium state and continuous interference suppression.

Key words: linear antenna array, flickering interference, adaptation algorithms, cognitive algorithm

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПРОГРАММНАЯ ИНЖЕНЕРИЯ

УДК 004.85

ГРНТИ 28.23.25

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОТТОКА АБОНЕНТОВ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОГО ОПЕРАТОРА: СРАВНЕНИЕ ЛОГИСТИЧЕСКОЙ РЕГРЕССИИ И ГРАДИЕНТНОГО БУСТИНГА

К. А. Акопьян, Т. И. Белая, Н. А. Бурмистров, М. В. Падерин

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Удержание существующих клиентов является одной из ключевых задач для телекоммуникационного оператора, поскольку привлечение нового абонента обходится значительно дороже сохранения действующего. В работе задача заблаговременного выявления склонных к уходу абонентов рассматривается как задача бинарной классификации. На открытом наборе данных, содержащем сведения о семи тысячах абонентов, выполнено сравнение двух методов машинного обучения: логистической регрессии как интерпретируемого базового метода и градиентного бустинга над решающими деревьями. Проанализировано влияние несбалансированности классов на качество моделей, проведено сравнение по нескольким показателям качества и по интерпретируемости. Показано, что на табличных данных умеренного объема усложнение модели практически не повышает качество предсказания, в силу чего выбор метода определяется требованиями к интерпретируемости и стоимости сопровождения.

отток абонентов, машинное обучение, логистическая регрессия, градиентный бустинг, бинарная классификация, несбалансированные данные

Удержание существующих клиентов экономически выгоднее привлечения новых. Так стоимость привлечения нового абонента в несколько раз превышает стоимость удержания. Это делает задачу заблаговременного выявления абонентов, склонных к расторжению договора, практически значимой. Если оператор способен с приемлемой точностью предсказать уход

абонента заранее, он получает возможность адресно предложить такому клиенту скидку или улучшенные условия обслуживания [1].

Формально задача ставится как бинарная классификация. По набору признаков, описывающих абонента (демографические сведения, состав подключенных услуг, тип договора, платежное поведение), требуется предсказать, уйдет абонент или останется. Качество модели определяется не столько общей долей правильных ответов, сколько способностью обнаруживать именно уходящих абонентов, составляющих меньшинство выборки [2].

Целью работы является построение и сравнительный анализ двух моделей, представляющих различные подходы: линейной интерпретируемой логистической регрессии и нелинейного ансамблевого градиентного бустинга. Для достижения цели решаются задачи предобработки и кодирования признаков, учета несбалансированности классов, обучения обеих моделей, их сравнения по показателям качества и интерпретируемости, а также формулировки рекомендаций по выбору модели.

Использован открытый набор данных Telco Customer Churn, широко применяемый как эталонный для задач прогнозирования оттока. Каждая запись соответствует одному абоненту и содержит демографические признаки, перечень подключенных услуг, параметры договора и числовые показатели: стаж обслуживания в месяцах, ежемесячный платеж и суммарные начисления. Основные характеристики набора приведены в таблице 1 [3].

ТАБЛИЦА 1. Характеристики набора данных

Характеристика	Значение
Число абонентов (объектов)	7043
Число признаков после кодирования	30
Доля ушедших абонентов, %	26.54
Размер тестовой выборки	1409
Коэффициент компенсации дисбаланса	2.77

Ключевая особенность набора – несбалансированность классов: доля ушедших абонентов составляет лишь четверть выборки. Модель, всегда предсказывающая сохранение абонента, формально достигла бы точности около 73 %, не обнаружив при этом ни одного реального ухода. Это опреде-

ляет выбор показателей качества и стратегии обучения. Предварительный анализ (рис. 1) показывает, что отток концентрируется среди абонентов на помесечном договоре, тогда как долгосрочный договор сам по себе удерживает клиента.

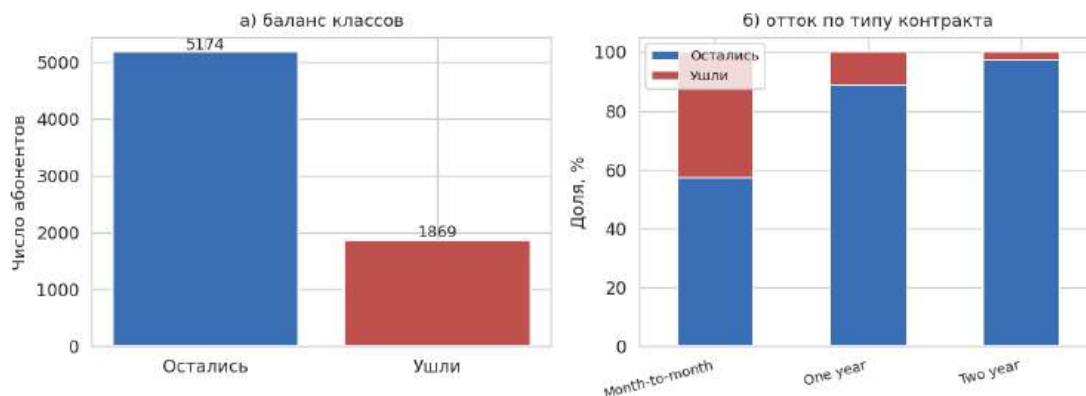


Рис. 1. Распределение классов (а) и доля оттока по типу договора (б)

Идентификатор абонента удален как не несущий предсказательной информации. Признак суммарных начислений приведен к числовому типу, пропуски у новых абонентов с нулевым стажем заполнены нулем. Целевая переменная преобразована к бинарному виду. Категориальные признаки закодированы методом прямого кодирования с удалением первой категории, что устраняет мультиколлинеарность и важно для корректной интерпретации коэффициентов линейной модели. Данные разделены на обучающую и тестовую выборки в соотношении 80/20 со стратификацией по целевой переменной. Числовые признаки стандартизованы, причем параметры масштабирования настроены только на обучающей выборке во избежание утечки информации.

В качестве базовой модели применена логистическая регрессия – простая линейная модель, задающая нижнюю границу качества и обладающая прямой интерпретируемостью: знак и величина коэффициента при признаке показывают направление и силу его влияния на вероятность оттока. В качестве усложненной альтернативы использован градиентный бустинг над решающими деревьями (реализация XGBoost), способный улавливать нелинейные зависимости и взаимодействия признаков [4]. Использованы 300 деревьев глубиной 4, скорость обучения 0,05, доли подвыборки объектов и признаков по 0,9. Несбалансированность классов компенсировалась взвешиванием: для логистической регрессии – автоматическим повышением веса редкого класса, для бустинга – соответствующим масштабирующим коэффициентом.

Ввиду несбалансированности классов общая точность сама по себе неинформативна. Поэтому модели оцениваются по совокупности показателей: точность (Accuracy), точность положительных предсказаний (Precision), полнота (Recall), их гармоническое среднее (F1-score) и площадь под характеристической кривой (ROC-AUC). В контексте оттока приоритетным является показатель полноты: пропуск уходящего абонента, как правило, дороже, чем напрасное предложение скидки остающемуся [2].

Итоговые значения показателей качества обеих моделей на тестовой выборке приведены в таблице 2.

ТАБЛИЦА 2. Сравнение показателей качества моделей

Метрика, %	Logistic Regression	XGBoost
Accuracy	74.02	74.73
Precision	50.69	51.6
Recall	78.61	77.54
F1-score	61.64	61.97
ROC-AUC	84.14	84.09

Главное наблюдение состоит в том, что модели показали практически одинаковое качество. Градиентный бустинг незначительно опередил логистическую регрессию по F1-score (61.97 против 61.64 %), однако по площади под характеристической кривой результат оказался в пользу логистической регрессии (84.14 против 84.09 %), а по полноте линейная модель также выше (78.61 против 77.54 %). Переход от простой модели к сложному ансамблю не дал ощутимого выигрыша в качестве.

Этот результат закономерен. На табличных данных умеренного объема, где большинство признаков являются бинарными (закодированные категории), линейная модель уже хорошо аппроксимирует зависимость, и пространства для улучшения за счет нелинейностей остается немного. Преимущество градиентного бустинга проявляется сильнее на больших объемах данных со сложными нелинейными взаимодействиями непрерывных признаков, что в рассматриваемой задаче отсутствует [4]. Матрицы ошибок (рис. 2) подтверждают, что обе модели распределяют ошибки схожим образом, уверенно обнаруживая большинство уходящих абонентов це-

ной заметного числа ложных срабатываний – прямого следствия настройки на высокую полноту.

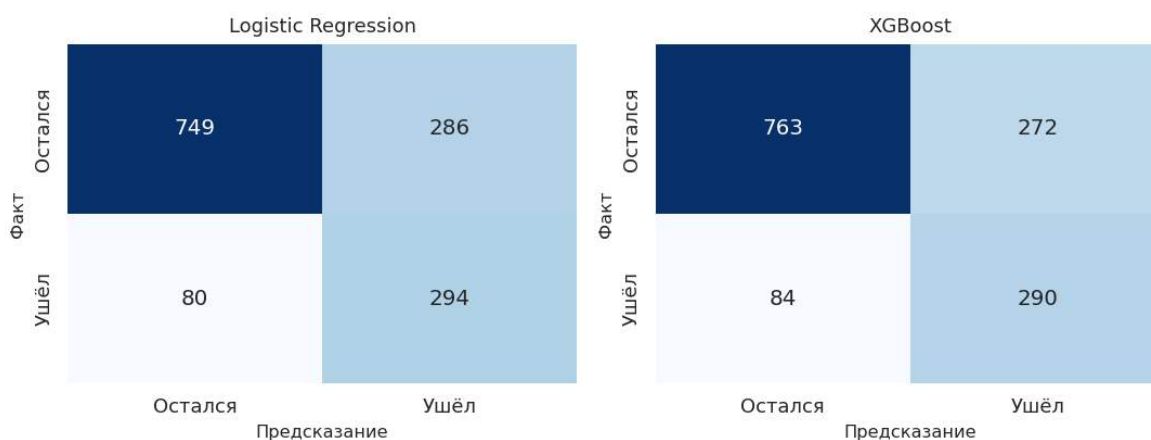


Рис. 2. Матрицы ошибок логистической регрессии и градиентного бустинга

Характеристические кривые практически совпадают, что согласуется с близкими значениями площади под ними (рис. 3, а). Кривые точность – полнота (рис. 3, б) дополнительно показывают, что обе модели существенно превосходят базовый уровень, заданный долей положительного класса.

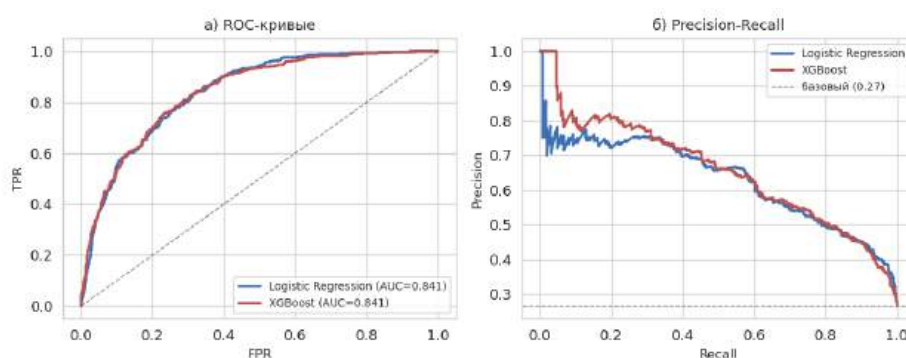


Рис. 3. Характеристические кривые (а) и кривые точность – полнота (б)

Главное различие моделей лежит не в точности, а в интерпретируемости. Логистическая регрессия дает прямую интерпретацию коэффициентов: больший стаж обслуживания и долгосрочный договор снижают вероятность оттока, тогда как подключение оптоволоконного доступа и оплата электронным чеком ее повышают. Градиентный бустинг позволяет оценить лишь важность признаков (рис. 4), но не направление их влияния. Примечательно, что обе модели согласованно выделяют одни и те же ключевые факторы – тип договора, стаж обслуживания и тип услуги доступа в сеть, что повышает доверие к выводам [5].

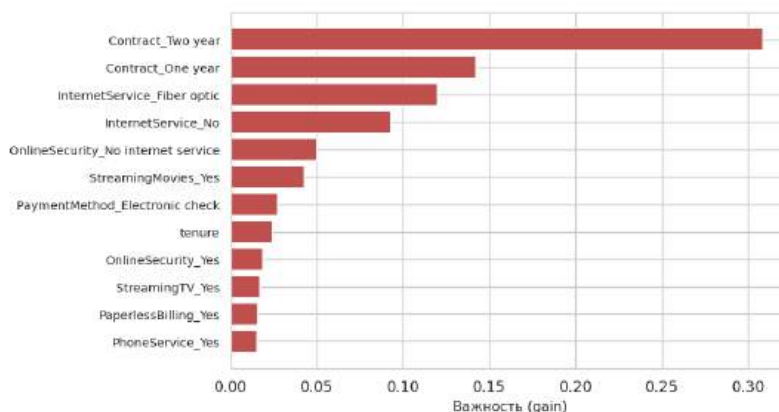


Рис. 4. Важность признаков по оценке градиентного бустинга

Построены и сравнены две модели прогнозирования оттока абонентов. Обе достигли сопоставимого качества (F1-score 61.64 и 61.97 %), при этом учет несбалансированности классов оказался ключевым условием высокой полноты. Усложнение модели не дало значимого выигрыша на данных рассматриваемого типа и объема, поэтому при сопоставимом качестве предпочтение разумно отдать более простой и интерпретируемой логистической регрессии, прибегая к градиентному бустингу лишь при наличии данных, на которых его способность улавливать нелинейности дает реальный прирост. Направлениями дальнейшей работы являются подбор порога классификации под экономический критерий и применение методов борьбы с несбалансированностью на уровне данных [6].

Список используемых источников

1. Provost F., Fawcett T. Data Science for Business. New York: O'Reilly Media, 2013. 414 p.
2. He H., Garcia E. A. Learning from Imbalanced Data // IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering. 2009. Vol. 21. N 9. P. 1263–1284.
3. BlastChar. Teleco Customer Churn // Kaggle. 2018. URL: <https://www.kaggle.com/datasets/blastchar/telco-customer-churn> (дата обращения: 20.05.2026).
4. Chen T., Guestrin C. XGBoost: A Scalable Tree Boosting System // Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. New York: ACM, 2016. PP. 785-794.
5. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. The Elements of Statistical Learning. 2nd ed. New York: Springer, 2009. 745 p.
6. Pedregosa F. et al. Scikit-learn: Machine Learning in Python // Journal of Machine Learning Research. 2011. Vol. 12. PP. 2825-2830.

**FORECASTING CUSTOMER CHURN OF A TELECOMMUNICATION
OPERATOR: COMPARISON OF LOGISTIC REGRESSION AND GRADIENT
BOOSTING**

Akopyan K., Belaya T., Burmistrov N., Paderin M.

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

Retaining existing customers is one of the key tasks for a telecommunication operator, as acquiring a new subscriber is significantly more expensive than retaining a current one. This paper considers the problem of early identification of customers prone to churn as a binary classification task. On an open dataset containing information about seven thousand subscribers, a comparison of two machine learning methods was performed: logistic regression as an interpretable baseline method and gradient boosting over decision trees. The influence of class imbalance on model quality was analyzed, and a comparison was made based on several quality metrics and interpretability. It is shown that on tabular data of moderate volume, model complexity practically does not improve prediction quality. Therefore, the choice of method is determined by requirements for interpretability and maintenance cost.

Key words: customer churn, machine learning, logistic regression, gradient boosting, binary classification, imbalanced data

УДК 519.25
ГРНТИ 27.43.51**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАЗЛИЧНЫХ РЕГРЕССИОННЫХ
МОДЕЛЕЙ****А. Б. Алексеев, О. М. Дмитриева, Н. М. Камартина**

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В настоящей работе проведен сравнительный анализ регрессионных моделей, применяемых для аппроксимации сигналов в задачах обработки данных. Рассматриваются три ортонормированные системы базисных функций: тригонометрическая система, полиномы Лежандра и полиномы Эрмита. Сравнение выполнено в условиях малой выборки. Качество аппроксимации оценивалось с помощью коэффициента детерминации, вычисляемого через остатки, что обеспечивает корректность сравнения независимо от свойств базиса. Полученные результаты позволяют обоснованно выбрать оптимальный класс базисных функций в задачах обработки сигналов и могут использоваться в учебном процессе при изучении регрессионного анализа.

регрессионная модель, коэффициент детерминации, ортонормированные системы функций: тригонометрическая система, полиномы Лежандра, полиномы Эрмита

1. Ортонормированные системы

Пусть $\xi = (X, Y)$ – двумерная случайная величина. Предположим, что регрессор X является непрерывной случайной величиной с плотностью распределения $p(x)$ (общий случай может быть рассмотрен аналогично с помощью интеграла Стильтеса). Метод наименьших квадратов, лежащий в основе получения уравнения регрессии, фактически использует расстояние в пространстве L_2 с весом, равным плотности распределения $p(x)$. Как известно из теории рядов Фурье, наилучшее (в смысле метрики упомянутого пространства L_2) приближение функции осуществляется отрезком ее ряда Фурье, построенного на системе ортонормированных функций в этом пространстве. Следовательно, в уравнении регрессии $Y = \varphi(X)$ должно быть эффективным использование выражения

$$\varphi(X) = a_0 + \sum_{j=1}^n a_j \varphi_j(X),$$

где система функций $\{1, \varphi_1(x), \varphi_2(x), \dots, \varphi_j(x), \dots\}$ является ортонормированной в пространстве L_2 с весом $p(x)$, числа $\{a_0, a_1, \dots, a_j, \dots\}$ – коэффициенты Фурье функции $\varphi(x)$ в разложении по системе этих функций.

Для случайных величин $\{1, \varphi_1(X), \varphi_2(X), \dots, \varphi_j(X), \dots\}$ математическое ожидание равно

$$M(\varphi_j(X)) = 0, \quad j = 1, 2, \dots,$$

дисперсия равна

$$D(\varphi_j(X)) = 1, \quad j = 1, 2, \dots$$

Если значения случайной величины X распределены равномерно на промежутке $[0, 2\pi]$, удобно использовать тригонометрическую систему функций $\{1, \sqrt{2} \sin x, \sqrt{2} \cos x, \dots, \sqrt{2} \sin jx, \sqrt{2} \cos jx, \dots\}$. Такой пример рассмотрен в статье [1]. Если значения случайной величины X распределены равномерно на промежутке $[-1, 1]$, то в качестве ортонормированной системы можно использовать и тригонометрическую систему функций $\{1, \sqrt{2} \sin \pi x, \sqrt{2} \cos \pi x, \dots, \sqrt{2} \sin j\pi x, \sqrt{2} \cos j\pi x, \dots\}$, и полиномы Лежандра [2]. Для построения уравнения регрессии использование тригонометрических систем равносильно (с точностью до линейного преобразования аргумента), так как от одного промежутка к другому можно перейти с помощью линейной замены переменной.

Ортонормированная система функций, построенная на основе полиномов Лежандра, имеет вид:

$$\varphi_j(x) = \sqrt{2j+1} \cdot P_j(x), \quad (1)$$

где полиномы Лежандра определяются формулой

$$P_j(x) = \frac{1}{j! 2^j} \cdot \frac{d^j}{dx^j} (x^2 - 1)^j, \quad j = 1, 2, \dots$$

Приведем явные выражения для пяти первых функций:

$$\begin{aligned} \varphi_1(x) &= \sqrt{3}x, \\ \varphi_2(x) &= \sqrt{5} \left(\frac{3}{2}x^2 - \frac{1}{2} \right), \\ \varphi_3(x) &= \sqrt{7} \left(\frac{5}{2}x^3 - \frac{3}{2}x \right), \\ \varphi_4(x) &= \sqrt{9} \left(\frac{35}{8}x^4 - \frac{15}{4}x^2 + \frac{3}{8} \right), \\ \varphi_5(x) &= \sqrt{11} \left(\frac{63}{8}x^5 - \frac{35}{4}x^3 + \frac{15}{8}x \right). \end{aligned}$$

Если значения случайной величины X распределены равномерно на промежутке $[a, b]$, то с помощью линейной замены переменной можно

перейти к промежутку $[-1, 1]$, и построить уравнение регрессии, используя описанные ортогональные системы.

Если значения случайной величины X распределены по нормальному закону на всей оси с параметрами $a = 0, \sigma = 1$ (что всегда можно сделать нормированием), то в качестве ортонормированной системы можно взять модифицированные полиномы Эрмита. Как известно [3], полиномы Эрмита

$$H_n(x) = (-1)^n \cdot e^{x^2} \cdot (e^{-x^2})^{(n)}$$

ортгональны в пространстве L_2 на всей оси с весом $p(x) = e^{-x^2}$, при этом

$$\int_{-\infty}^{+\infty} H_n^2(x) \cdot e^{-x^2} dx = \sqrt{\pi} \cdot 2^n \cdot n!.$$

Следовательно, ортонормированной системой в пространстве L_2 на всей оси с весом $p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}}$, который является плотностью для нормального распределения с параметрами $a = 0, \sigma = 1$, будет система функций $\{1, \varphi_1(x), \varphi_2(x), \dots, \varphi_n(x), \dots\}$, где

$$\varphi_n(x) = \frac{H_n\left(\frac{x}{\sqrt{2}}\right)}{\sqrt{2^n \cdot n!}}. \quad (2)$$

Выражения для первых пяти функций имеют вид:

$$\begin{aligned} \varphi_1(x) &= x, \\ \varphi_2(x) &= \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot (x^2 - 1), \\ \varphi_3(x) &= \frac{1}{\sqrt{6}} \cdot (x^3 - 3x), \\ \varphi_4(x) &= \frac{1}{2\sqrt{6}} \cdot (x^4 - 6x^2 + 3), \\ \varphi_5(x) &= \frac{1}{2\sqrt{30}} \cdot (x^5 - 10x^3 + 15x). \end{aligned}$$

Приведем сравнительный анализ регрессионных моделей, построенных на рассмотренных ортонормированных системах после масштабирования значений случайной величины X на промежуток $[-1, 1]$ в условиях выборки малого объема, $n = 20$.

Для оценки качества регрессионных моделей коэффициент детерминации вычислим по формуле [4]

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} = \frac{RSS}{TSS},$$

где TSS – общая сумма квадратов, RSS – сумма квадратов, обусловленная регрессией.

Такой подход необходим для корректного сравнения трех различных базисов на малой выборке и исключает риск получения $R^2 > 1$, поскольку для полиномов Лежандра гарантировать ортонормированность системы на выборке объема $n = 20$ невозможно.

2. Пример

Рассмотрим экспериментальные данные значений двумерной случайной величины $\xi = (X, Y)$ (табл. 1).

ТАБЛИЦА 1. Экспериментальные данные

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
x	92	115	81	106	88	124	73	97	84	112
y	-21,5	-24,8	-18,9	-23,2	-20,1	-27,3	-16,5	-22,0	-19,4	-25,1
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
x	79	103	94	118	86	109	77	101	90	121
y	-18,5	-22,7	-21,0	-26,4	-19,8	-24,0	-17,6	-22,3	-20,5	-26,9

С помощью критерия χ^2 при уровне значимости $\alpha = 0,05$ проверено, что случайная величина X имеет нормальное распределение с выборочным математическим ожиданием 97,5 и выборочной дисперсией 288,85.

Для тригонометрической системы функций и полиномов Лежандра перейдем с помощью линейной замены $X' = \frac{X-97,5}{25,5}$ к промежутку $[-1, 1]$. Для полиномов Эрмита проведем стандартизацию данных с помощью формулы $X'' = \frac{X-97,5}{\sqrt{288,85}}$. После применения регрессионного анализа для первых четырех функций ортонормированной системы получены следующие результаты:

1) для тригонометрического базиса:

$$y = -22,16 - \sqrt{2} \cdot (2,12 \sin(\pi x') - 0,11 \cos(\pi x') - 1,12 \sin(2\pi x') - 0,01 \cos(2\pi x')), \\ R^2 \approx 0,603;$$

2) для полиномов Лежандра, используем систему функций (1):

$$y = -22,11 - 2,92 \cdot \varphi_1(x') - 0,03 \cdot \varphi_2(x') - 0,17 \cdot \varphi_3(x') + 0,08 \cdot \varphi_4(x'),$$

$$R^2 \approx 0,993;$$

3) для полиномов Эрмита, используем систему функций (2):

$$y = -21,73 - 3,36 \cdot \varphi_1(x'') + 0,67 \cdot \varphi_2(x'') - 0,65 \cdot \varphi_3(x'') + 0,63 \cdot \varphi_4(x''),$$
$$R^2 \approx 0,993.$$

Все расчеты были выполнены в Excel с использованием надстройки «Анализ данных».

Несмотря на то, что полиномы Эрмита являются естественным базисом при нормальном распределении случайной величины X , оказалось, что для работы с выборкой малого объема на конечном промежутке полиномы Лежандра также обеспечивают быструю и устойчивую сходимость коэффициента детерминации и значительно превосходят тригонометрический базис, как видно из рис. 1.

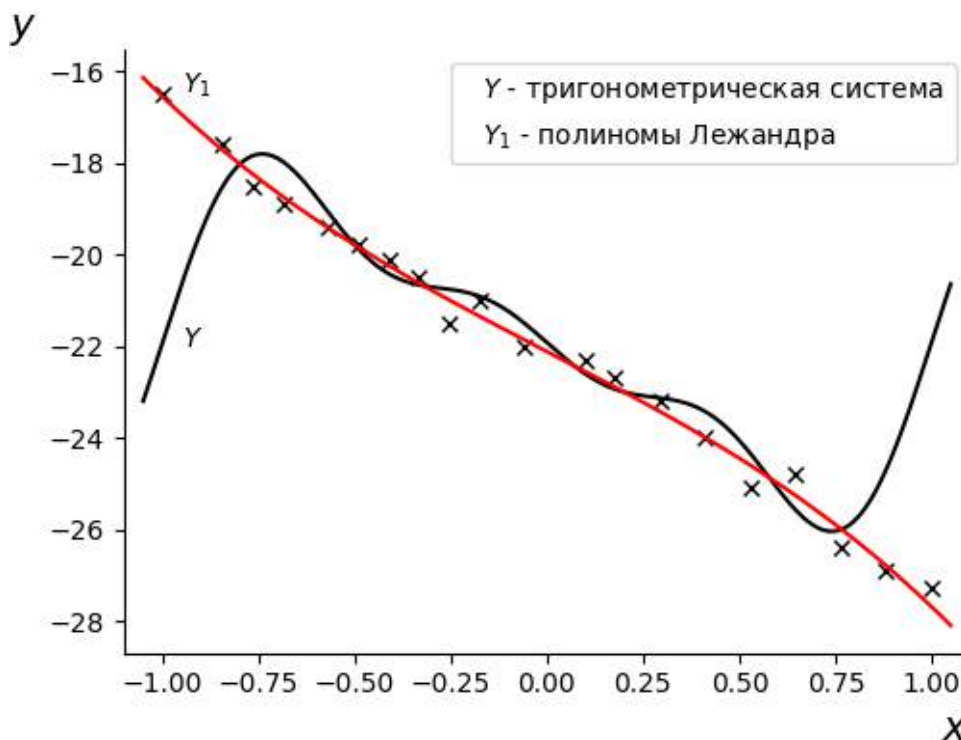


Рис. 1. Экспериментальные данные и кривые регрессии

Список используемых источников

1. Дмитриева О. М., Камартина Н. М., Тациян Г. М. Регрессия и коэффициент детерминации // НТК ППС 2025 СПб.: СПбГУТ, 2025. С. 514-520.
2. Краснопевцев Е. А. Математические методы физики. Ортонормированные базисы функций: Уч. Пособие. 2-е изд., СПб.: Лань, 2018.

3. Раткевич А. С. Разложение функций в базисе полиномов Эрмита // Инфокоммуникации: 55-я юбилейная конференция аспирантов, магистров и студентов, Минск, 22–26 апреля 2019 г. Минск: БГУИР, 2019. С. 83–84.

4. Тимофеев В. С., Фаддеев А. В., Щеколдин В. Ю. Эконометрика: Учебник для вузов. 2-е изд., Москва.: Юрайт, 2026.

COMPARATIVE ANALYSIS OF VARIOUS REGRESSION MODELS

Alekseev A. B., Dmitrieva O. M., Kamartina N. M.

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

In this work we perform a comparative analysis of regression models, which are used to approximate signals in data processing tasks. We consider three orthonormal function bases: trigonometric system, Legendre polynomials and Hermite polynomials. The comparison is conducted on a small sample. The quality of the approximation is estimated through the coefficient of determination, which is computed using residuals, ensuring the correctness of the comparison regardless of the properties of the chosen basis. The obtained results allow one to judiciously choose the optimal class of basis functions for the signal processing tasks and could be used in the educational process when studying regression analysis.

Key words: regression model, coefficient of determination, orthonormal systems of functions: trigonometric system, Legendre polynomials, Hermite polynomials

УДК 004.928

ГРНТИ 50.15.29

ДИЗАЙН ИГРОВЫХ ЛОКАЦИЙ: ВЛИЯНИЕ НА ПОГРУЖЕНИЕ, НАВИГАЦИЮ И ИГРОВОЙ ОПЫТ

Б. А. Аль-Нами, Д. С. Мосякин

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Дизайн игровых локаций перестал быть просто фоном для игрового процесса. Сегодня он играет очень важную роль, оказывая воздействие как на игровой сюжет, так и на эмоции игроков и напрямую влияет на удобство навигации. Красочная локация не всегда означает функциональную. Цель статьи – определить, как дизайн игровых пространств влияет на восприятие пользователя и эффективность прохождения, а также выявить некий баланс между художественными ценностями и игровым опытом.

игровые локации, level design, погружение, навигация, игровой опыт, геймдизайн, визуальное восприятие

В ходе анализа игровых проектов различных жанров (RPG, шутеры, квесты, платформеры) были выделены две основные категории локаций.

Линейные и сценарные локации: пространство ведет игрока по заранее заданному маршруту, используя различные ограничения и направляющие элементы (свет, цвет, архитектуру). Основная задача поддерживать нарратив и ритм игры. Примером служат коридорные уровни в Half-Life, Doom, или сюжетные локации в The Last of Us.

Открытые и полуоткрытые локации: игрок самостоятельно исследует пространство, выбирает свой путь и взаимодействует с окружением. Дизайн таких локаций должен незаметно направлять игрока к целям без использования явных указателей или ограничений. Примерами таких игр могут послужить – Elden Ring или The Legend of Zelda: Breath of the Wild.

Преимущества продуманного дизайна локаций: детализированное окружение усиливает эффект присутствия. Игроки дольше удерживают внимание на визуале виртуального мира и сильнее вовлекаются в игровой процесс. Например, мрачные коридоры в играх серии Resident Evil вызывают страх и постоянную напряженность, а яркие просторы в Satisfactory – спокойствие.

Качественный level design позволяет игроку интуитивно находить путь. Цветовые акценты, контрастное освещение и различные ориентиры снижают потребность в мини-карте и уменьшают когнитивную нагрузку.

Продуманные локации содержат скрытые зоны, альтернативные пути и «пасхалки». Это повышает общее время в игре и лояльность аудитории.

Риски и ограничения: визуально перенасыщенные локации рассеивают внимание. Игрок может не заметить ключевые объекты или интерактивные элементы. В исследовательских играх это может привести к фрустрации и снижению темпа прохождения.

Отсутствие четких ориентиров в играх с большим открытым миром заставляет игроков постоянно обращаться к карте или “гайдам” в интернете. Это разрушает погружение и вызывает негативные эмоции. Потеря направления – одна из ключевых проблем, встречающихся у большинства геймеров (рис. 1).

Слишком сильно детализированные или плохо оптимизированные локации могут вызывать падение FPS на консолях и слабых ПК, что критично для шутеров и экшенов.

Для проверки гипотезы и выявления реального отношения пользователей к дизайну игровых локаций был проведен онлайн-опрос. Проанализируем результаты его основных вопросов:

68,2 % опрошенных считают визуальный стиль локации очень важным для себя, в то время как 31,8 % склоняются к тому, что визуальный стиль скорее важен. В то же время никто из опрошенных не назвал дизайн локаций «не важным» (см. рис 1).

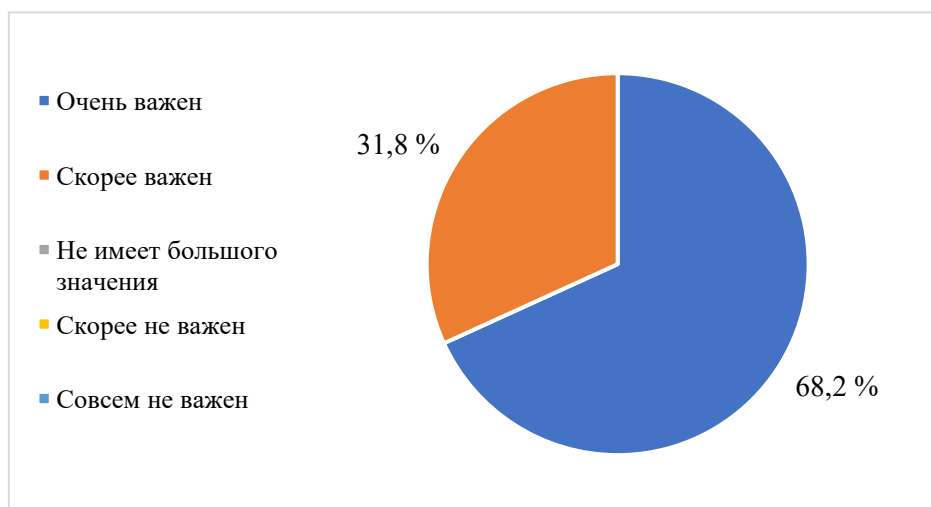


Рис. 1. Насколько для вас важен визуальный стиль локации (архитектура, детали окружения, атмосфера)

Подавляющее большинство опрошенных (59,1 %) отметили, что плохой дизайн игровых локаций часто ведет к потере направления. У 13,6 % опрошенных проблема потери направления возникает очень часто, а 22,7 % ответили, что редко теряются в играх. Лишь 4,5 % выбрали вариант «никогда», что подчеркивает наличие проблемы плохого дизайна уровней (рис. 2).

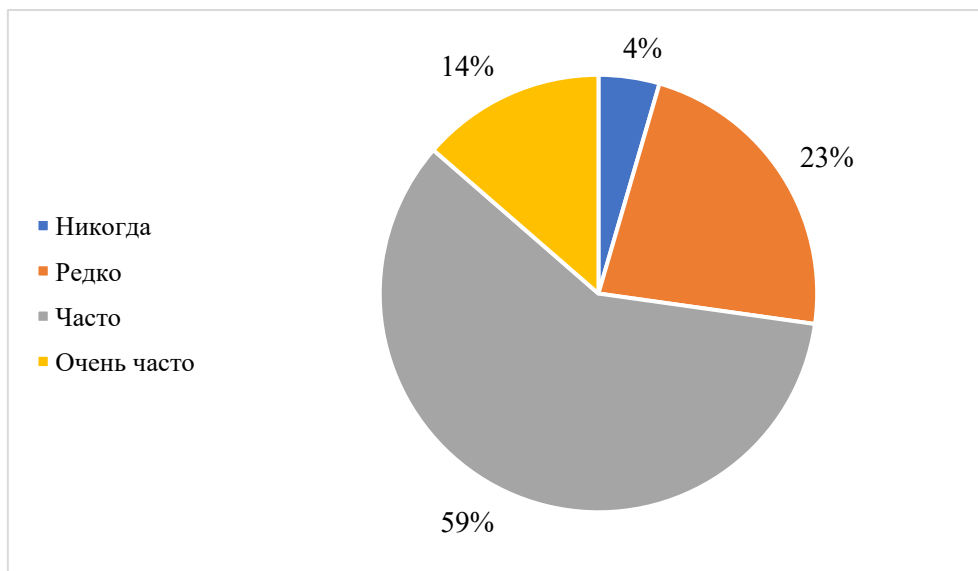


Рис. 2. Как часто вы теряетесь в игровых локациях из-за плохого дизайна?

68,2 % Опрошенных назвали нелогичную структуру главным раздражителем в дизайне локаций. Так же большими проблемами являются однообразные пространства (63,6 %) и слишком запутанные уровни (45,5 %). 36,4 % не устраивает отсутствие карты, а 13,6 % пользователей получают раздражения из-за наличия избыточных указателей (см. рис 3).

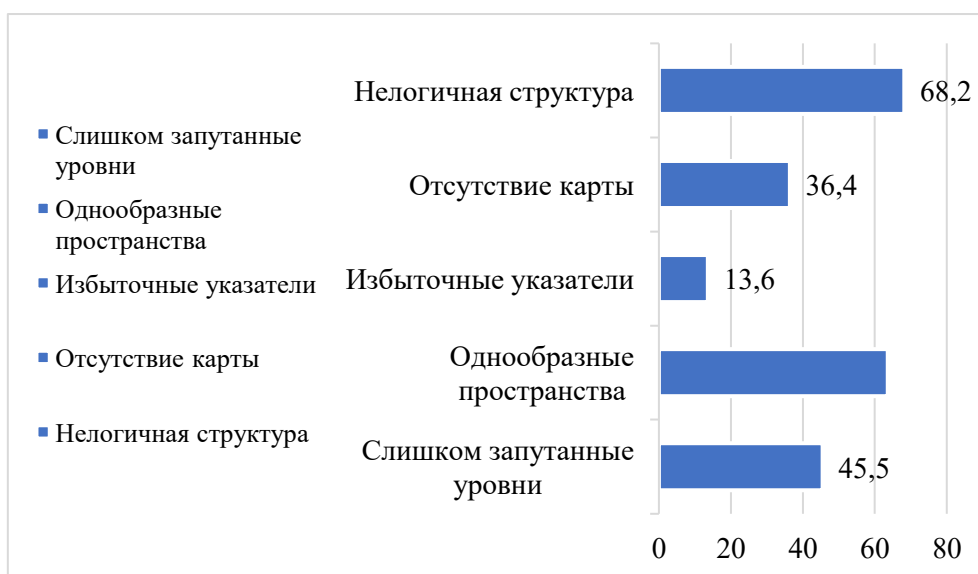


Рис. 3. Что вызывает у вас наибольшее раздражение?

Большинстве опрошенных отметило два основных элемента дизайна, помогающих погрузиться в игру – детализация пространства (77,3 %) и правильно подобранная атмосфера (72,7 %). Чуть менее популярным был вариант история, переданная через окружение (63,6 %). Меньше половины опрошенных выбрали варианты освещение (36,4 %) и масштаб локации (36,4 %) (рис. 4).

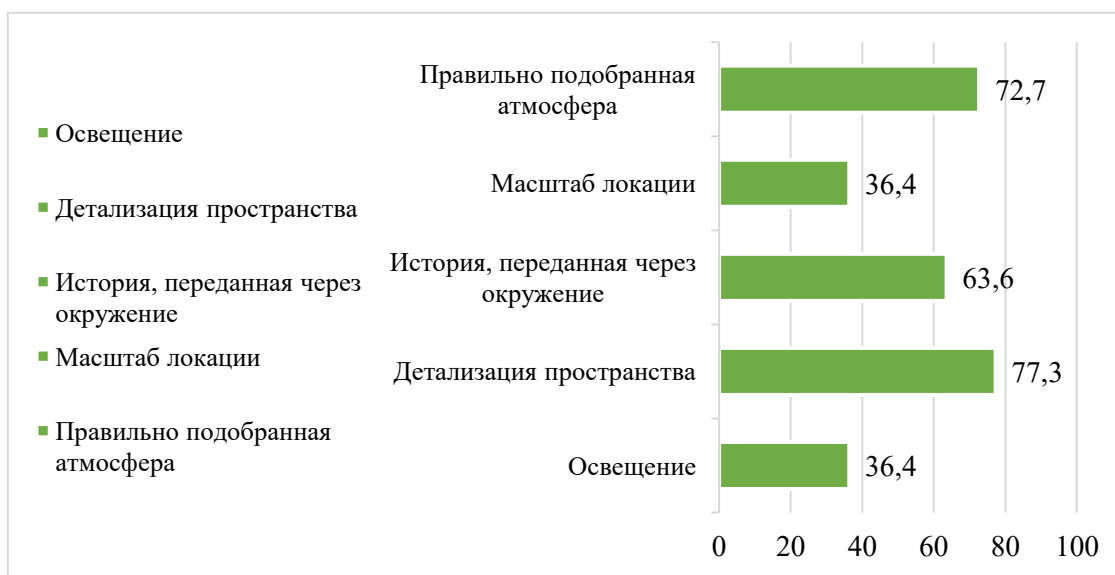


Рис. 4. Какие элементы сильнее всего помогают вам погрузиться в игру?

Проведенное исследование подтвердило выдвинутую гипотезу: визуальная эстетика игровых локаций действительно была высоко оценена игроками, однако ее избыточность или неправильное расположение напрямую снижают эффективность навигации и игрового опыта в целом. 59,1 % опрошенных часто теряют направление из-за плохо выстроенной структуры уровней, а 13,6 % сталкиваются с этой проблемой очень часто.

Главным раздражителем оказалась нелогичная структура локаций, за которой следуют однообразие и запутанность. При этом ключевыми элементами погружения игроки назвали историю, переданную через окружение, и детализацию пространства.

Таким образом, эффективный дизайн игровых локаций требует баланса между красочными локациями и ясностью ориентирования в них. Разработчикам рекомендуется избегать нелогичных и однообразных пространств, а также чаще стараться использовать окружение как инструмент повествования.

Список используемых источников

1. Три подхода к проектированию локаций. URL: <https://gb.ru/posts/tri-podhoda-k-proektirovaniu-locacii> (дата обращения: 11.05.2026).
2. Brown M. The Language of Level Design / M. Brown // Game Maker's Toolkit, 2023. URL: <https://www.youtube.com/@GMTK> (дата обращения: 11.05.2026).
3. Как создают игровые уровни – от идеи до мира. URL: <https://digital-razor.ru/media/articles/workstation/game-level-creation/> (дата обращения: 11.05.2026).
4. How to Plan Level Designs and Game Environments in 11 Steps. URL: https://www.worldofleveldesign.com/categories/level_design_tutorials/how-to-plan-level-designs-game-environments-workflow.php (дата обращения: 11.05.2026).
5. Schell J. The Art of Game Design / J. Schell. 3rd ed. CRC Press, 2024. Глава 11: «World and Level Design».

DESIGN OF GAME LOCATIONS: INFLUENCE ON IMMERSION, NAVIGATION, AND GAMING EXPERIENCE

Al-Nami B., Mosyakin D.

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

The design of game locations has ceased to be merely a backdrop for gameplay. Today, it plays a crucial role, influencing both the game's narrative and players' emotions, while directly affecting navigation efficiency. A visually rich location is not always functional. The aim of this article is to determine how the design of game spaces affects user perception and completion efficiency, as well as to identify a balance between artistic value and gaming experience.

Key words: game locations, level design, immersion. Navigation, gaming experience, game design, visual perception

УДК 004.514

ГРНТИ 50.10.03

РОЛЬ МЕНТАЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ В UX-ДИЗАЙНЕ

Б. А. Аль-Нами, А. Р. Скажутин

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Ментальные модели пользователей служат основой для проектирования интуитивно понятных интерфейсов в UX-дизайне. На основе закона Якоба раскрывается, как прошлый опыт аудитории формирует ее поведение в цифровой среде. Цель статьи – определить методы адаптации технической логики продукта под ожидания пользователей и выявить баланс между креативным визуалом и доступностью интерфейса.

ментальные модели, UX-дизайн, пользовательский опыт, паттерны взаимодействия, концептуальная модель, UX-исследования, юзабилити, доступность интерфейса, ИТ

При разработке любого интерфейса, будь то сайт или приложение, важно спрашивать себя: «Насколько мой дизайн понятен пользователю?». Сможет ли человек ориентироваться в продукте свободно, достигая своих целей без лишних когнитивных усилий и задержек? Ответить на эти вопросы помогут ментальные модели пользователей. Ментальная модель в UX-дизайне – это внутреннее представление пользователя о том, как работает система или цифровой продукт [1]. В более широком смысле это наши представления о функционировании чего бы то ни было в мире. В основе ментальных моделей лежит не объективная техническая логика, а прошлый опыт человека, его мысли и убеждения насчет того, как должна работать система. Проще говоря, пользователи вашего будущего продукта еще заранее, даже до его выхода, примерно знают (или думают, что знают), как он будет устроен [2].

Чтобы понять принцип работы ментальных моделей, стоит вспомнить Якоба Нильсена – датско-американского эксперта по юзабилити, автора известных многим «10 эвристик» [3]. Некоторые из них, к слову, напрямую связаны с ментальными моделями. Однако в этой теме ключевым является «закон Якоба»: пользователи большую часть своего времени проводят на сайтах, отличных от вашего. Таким образом, большая часть ментальных моделей будет зависеть от информации, полученной из других сайтов. Опи-

раясь на этот закон, нам необходимо проектировать интерфейсы, используя базовые принципы навигации сайтов или приложений из той же сферы, к которой относится наш продукт.

Первые ментальные модели в UX строились на скевоморфизме – прямом подражании реальности. На заре смартфонов пользователям не хватало тактильных ориентиров, поэтому дизайнеры использовали узнаваемые образы. Например, «книжная полка» в iBooks от Apple с детальной текстурой дерева помогала мозгу мгновенно считать логику приложения: на плоском экране воспроизводился знакомый процесс выбора и перелистывания физических книг (рис. 1).



Рис. 1. Пример приложения с использованием скевоморфизма

Когда базовые паттерны взаимодействия закрепились, избыточный реализм стал лишним. С выходом iOS 7 индустрия перешла к флэт-дизайну, отказавшись от сложных текстур и теней. Пользователи уже привыкли к цифровой среде, поэтому схематичного конверта стало достаточно для обозначения почты, а простого силуэта шестеренки – для настроек.

Очевидно, что ментальные модели пользователя формируют его поведенческие модели. То есть, пользователь, попадая на сайт или заходя в приложение, совершает действия, опираясь на свои внутренние ожидания. Чтобы их понять, нам нужно заранее ответить на вопросы, которые возникают у пользователя в первые секунды взаимодействия: «что это?», «что можно с этим сделать?», «как это работает?», «что там внутри?», «что будет, если...?», «безопасно ли это?» и т. д. Ответы на них должны быть интуитивно понятными и считываться мгновенно.

Рассмотрим примеры хорошего и плохого юзабилити с точки зрения ментальных моделей. Возьмем два сервиса по аренде недвижимости, «Яндекс.Недвижимость» и «Островок!». Можно провести детальный анализ, но для наглядности мы остановимся на одном конкретном примере – экране с избранными объявлениями. У «Островок!» под объявлениями располагается кнопка с загадочной надписью «Скопировать». Для пользователя это непривычный формат – обычно подобные кнопки ставят рядом с тем или иным текстом, чтобы его можно было скопировать в один клик. Здесь же перед нами карточки отелей, и лишь спустя время становится понятно, что кнопка копирует ссылку на всю страницу избранного. В «Яндекс.Недвижимости» ситуация полностью противоположная – кнопка имеет недвусмысленное и понятное название «Поделиться избранным», располагается прямо рядом с названием раздела, и, для окончательной ясности, рядом с текстом в ней располагается привычная для пользователей иконка, означающая репост (рис. 2).

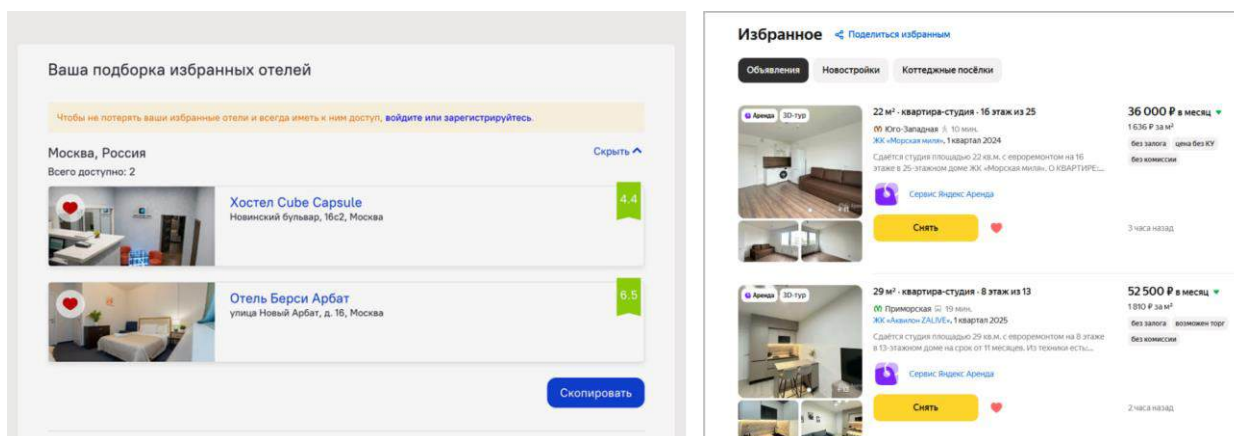


Рис. 2. Сравнение интерфейсов двух сервисов-конкурентов

Одна из главных проблем при проектировании дизайна – несоответствие ментальной модели дизайнера (она еще называется концептуальной моделью) ментальной модели пользователя. Если нам при проектировании кажется, что страница нашего сайта или экран приложения полностью понятны, это совсем не гарантирует, что он будет понятен для пользователя, который, как правило, имеет гораздо меньшую насмотренность, чем дизайнер, проектирующий для него интерфейс [4]. Именно поэтому так важны исследования аудитории нашего продукта. Примером таких UX-исследований являются глубинные интервью, А/В тесты, JTBD, CJM, метод карточек и метод наблюдения. Эти методы позволяют увидеть продукт гла-

зами пользователя и вовремя обнаружить разрыв между задумкой дизайнера и реальным восприятием пользователей.

Когда продукт вводит функции, не имеющие аналогов в прошлом опыте пользователя, возникает барьер восприятия. В такой ситуации перед дизайнером стоит выбор: либо адаптировать систему под устоявшиеся ментальные модели, либо менять сами модели, обновляя их в сознании аудитории. Чтобы реализовать второй сценарий и снизить риск отторжения, применяют различные методы, например, онбординг, контекстные текстовые подсказки, интерактивное обучение. Вместо интуитивного угадывания пользователь проходит через контролируемый сценарий, который формирует у него новый устойчивый паттерн взаимодействия (рис. 3) [5].

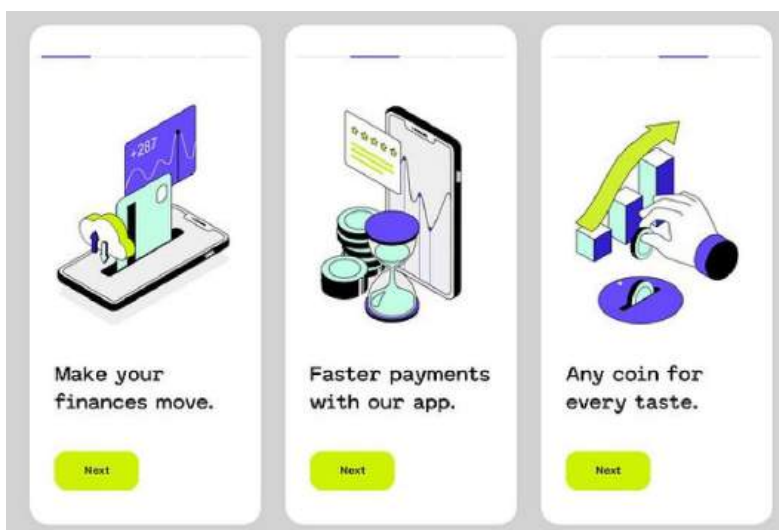


Рис. 3. Пример онбординга (знакомство с функциями) в приложении

Подводя итог, можно сказать, что работа с ментальными моделями – это неотъемлемая часть грамотного UX, влияющая как на комфорт пользователей, так и на прибыль компании. Успех любого цифрового продукта напрямую зависит от того, насколько точно его интерфейс совпадает с внутренними установками и прошлым опытом человека. В погоне за уникальностью важно соблюдать баланс: креативность и эффектный визуал не должны идти в ущерб доступности. Дизайнеру необходимо уделять логике и удобству столько же внимания, сколько и эстетике. Качественный UX невозможен без предварительных исследований, которые позволяют синхронизировать техническую логику продукта с живым человеческим восприятием.

Список используемых источников

1. Свеженцева А. Ментальные модели в проектировании и дизайне интерфейсов продукта (UX/UI). URL: <https://ux-journal.ru/designing-digital-mental-models.html> (дата обращения: 05.04.2026).
2. Ментальные модели // Команда AskUsers. URL: <https://askusers.ru/blog/osnovy-ux/mentalnye-modeli/> (дата обращения: 05.04.2026).
3. Нильсен Я. Веб-дизайн. Москва: Вильямс, 2003. С. 135-141.
4. 3 примера, в которых доступность помогла заработать денег, подсветить ошибки и решить споры // Dodo Engineering. URL: <https://habr.com/ru/companies/dododev/articles/718416/> (дата обращения: 05.04.2026).
5. Эяль Н., Хувер Р. На крючке. Как создавать продукты, формирующие привычки. Москва: Манн, Иванов и Фербер, 2014. С. 62-67.

THE ROLE OF MENTAL MODELS IN UX DESIGN

Al-Nami B., Skazhutin A.

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

User mental models serve as the foundation for designing intuitive interfaces in UX design. Based on Jakob's Law, the study reveals how users' past experience shapes their behavior in the digital environment. The purpose of this article is to define methods for adapting a product's technical logic to user expectations and to identify the balance between creative visuals and interface accessibility.

Key words: *mental models, UX design, user experience, interaction patterns, conceptual model, UX research, usability, interface accessibility, IT*

УДК 37.016:004
ГРНТИ 15.21.15

ДИЗАЙН ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ПОСОБИЙ: ВЛИЯНИЕ ЦВЕТА НА ОБУЧАЮЩИХСЯ И ПРОЦЕСС ОБУЧЕНИЯ

Б. А. Аль-Нами, Д. И. Колпаков

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В статье рассматривается влияние цвета, геймификации и избыточности элементов оформления на эффективность обучения, вовлеченность обучающихся и процесс обучения. Был произведен сбор данных с помощью анонимного интернет-анкетирования среди более чем 20 студентов 2-го курса, проведен анализ и выявлена общая тенденция, подтверждающаяся альтернативными исследованиями и сторонними источниками. Целью данной статьи является разработка практических рекомендаций для верстальщиков, дизайнеров и редакторов образовательных пособий.

образование, когнитивная нагрузка, психология цвета, геймификация, дизайн образования

Образовательное пособие – это материалы, направленные на формирование знаний и навыков. Пособия классифицируются на печатные, цифровые и гибридные. Их создание не является процессом интуитивным, а имеет четкую структуру и требования, опираясь на когнитивную эргономику – науку об организации рабочей среды.

Ключевой теорией для эффективного написания образовательного пособия является теория когнитивной нагрузки Джона Свеллера [1]. В ней приводится тезис, суть которого сводится к ограничениям рабочей, «оперативной» памяти человека. Согласно этой теории, рабочая память может одновременно удерживать лишь 3-5 информационных элементов. При этом, если элементов становится больше, то повышается нагрузка, а обучение становится более затратным и менее эффективным. Задача хорошего дизайна – минимизировать пустую нагрузку на сознание, которая тратится на поиск нужного элемента среди лишних картинок и видео.

Теория когнитивного мультимедийного обучения Ричарда Майера дополняет теорию Джона Свеллера. В работе Майера выдвигается тезис о двух каналах обработки – визуально-образного и слухо-вербального [2]. На основе этого тезиса выводится наблюдение: при согласованности нагрузки на оба канала – эффективность обучения повышается. Если же один канал перегружается, то результаты ухудшаются. В своей работе Майер сформулировал 12 принципов для построения грамотного дизайна, которые войдут в основу практических рекомендаций, изложенных ниже в статье. Теория Майера подтверждается данными опросов студентов (рис. 1).

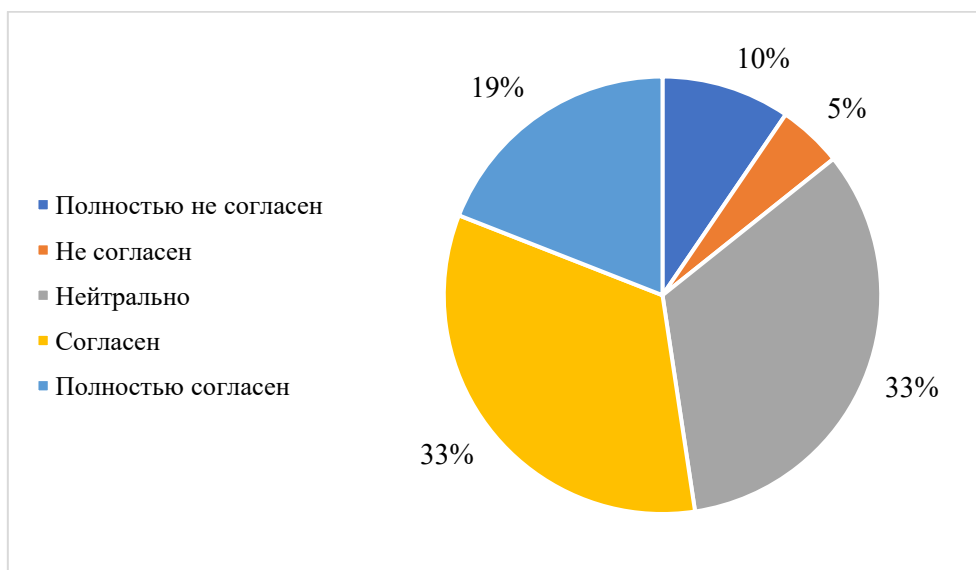


Рис. 1. Результаты анкетирования: лишние анимации и фоновые видео на учебной странице мешают мне сосредоточиться

Влияние цвета на настроение и внимательность хорошо изучено мировой психологией. Эксперимент Джульетты Дефирон с соавторами на 268 студентах и школьниках доказал [3], что использование цвета вызывает положительные эмоции и помогает сфокусировать внимание на важных элементах. Эти выводы подтверждаются личными ощущениями студентов, которые они выразили в ответах на вопрос опроса (рис. 2).

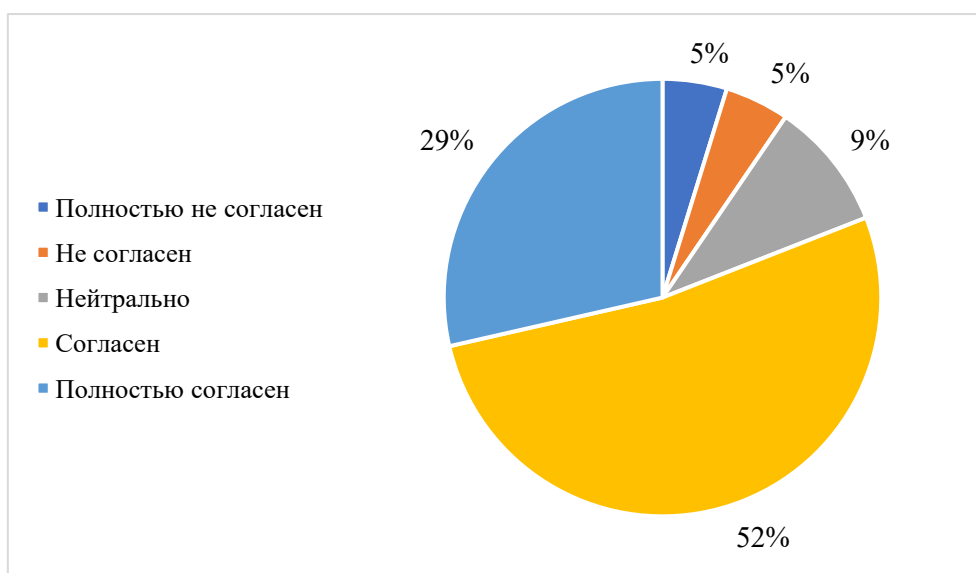


Рис. 2. Результаты анкетирования: выделение ключевых терминов цветом помогает мне запомнить их

Исследование Льянарес с соавторами [4] доказало тезис: холодные тона стен учебного помещения, повышают продуктивность, сосредоточенность на задачах и работу памяти. Для цифрового обучения, онлайн-курсов

и различных LMS-систем – важнейшим критерием в их дизайне становится интуитивность, с чем соглашается большинство опрошенных (рис. 3).

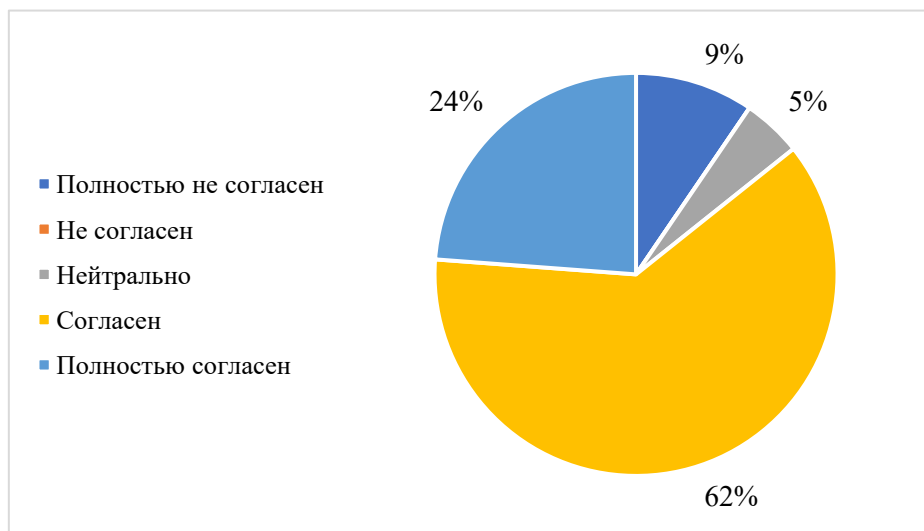


Рис. 3. Результаты анкетирования: удобная навигация (очевидные кнопки, поиск, оглавление) важнее красивого оформления

Помимо хорошо исследованных фактов о психологии цвета, существуют более современные исследования геймификации. Геймификация – это внедрение в учебный процесс игровых и соревновательных элементов: рейтингов, значков, квестов. Мета-анализ Дзэн с соавторами [5] приходит к выводу: геймификация положительно влияет на академическую успеваемость обучающихся, и может использоваться для повышения удержания обучающихся на курсе. Студенты в большинстве своем, более 67 %, согласны с тем, что геймификация положительно влияет на их собственную вовлеченность (рис. 4).

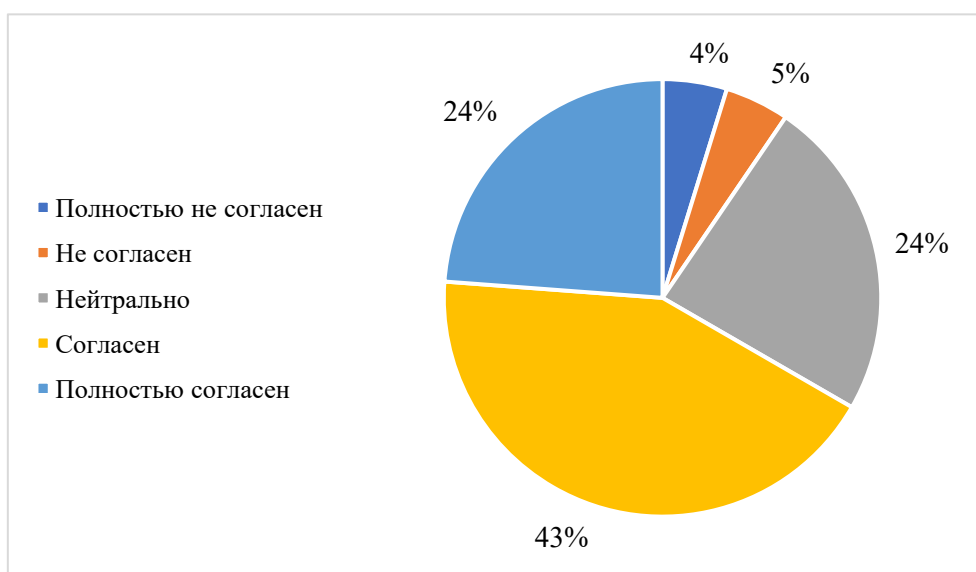


Рис. 4. Результаты анкетирования: баллы, значки и система рейтинга за выполненные задания повышают мою мотивацию учиться

Ниже приведены практические рекомендации для составления образовательных пособий, учебников и сборников заданий.

Выбор вида пособия. Выбор вида пособия зависит от целей, которые автор закладывает в свой учебный материал. Для изучения большого объема теоретического материала по сложным темам, требующим вдумчивого и сосредоточенного чтения, лучше подойдет печатное пособие. Для практических работ и повторения пройденного материала лучше подойдет электронный вид.

Цвет. Ключевые термины, формулы следует выделять цветом, для лучшей запоминаемости. Цветной фон, бессмысленные звуковые эффекты и анимации отвлекают, создают лишнюю когнитивную нагрузку, что понижает эффективность обучения и повышают усталость от учебы.

Геймификация. Внедрение элементов игровых и соревновательных систем повышает заинтересованность и вовлеченность обучающихся.

В ходе исследования были подтверждены средствами анонимного электронного онлайн-голосования, выводы исследований о влиянии цвета, шрифта, расположения элементов, геймификации на процесс обучения. Поскольку выборка была небольшой, необходимы дальнейшие исследования в данной области, для подтверждения результатов.

На основе полученных данных были составлены понятные и полезные практические рекомендации для составителей образовательных пособий.

Список используемых источников

1. Sweller J., van Merriënboer J.J.G., Paas F. Cognitive architecture and instructional design: 20 years later // *Educational Psychology Review*. 2019. Т. 31. С. 261-292.
2. Mayer R.E. *Multimedia Learning*. – Cambridge: Cambridge University Press, 2024. 350 p.
3. Desiron J.C., et al. Exploring the relationship between information relevance and colorfulness in multimedia learning // *Frontiers in Psychology*. 2024. Т. 15. Art. 1393113.
4. Linares C., Higuera-Trujillo J. L., Serra J. Cold and warm colored classes. Effects on students' attention and memory measured by psychological and neurophysiological responses // *Building and Environment*. 2021. Т. 196. Art. 107726.
5. Zeng J., Sun D., Loi C.K., Fan A. C. W. Investigating the effects of gamification on student academic performance: A comprehensive meta-analysis of studies from 2008 to 2023 // *British Journal of Educational Technology*. 2024. Т. 55. № 6. С. 2478-2502.

**EDUCATIONAL MATERIALS DESIGN: THE INFLUENCE OF COLOR
ON LEARNERS AND THE LEARNING PROCESS**

Al-Nami B., Kolpakov D.

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

The study examines how color, gamification, and excessive design elements affect learning efficiency and student engagement. Based on cognitive load theory and Mayer's principles of multimedia learning, the authors conducted an anonymous online survey among students. The results confirm that highlighting key terms with color improves memorization, while cold tones increase concentration. Gamification boosts motivation, but visual clutter raises cognitive load. Practical recommendations for layout designers and editors of educational materials are provided.

Key words: education, cognitive load, color psychology, gamification, educational design

УДК 622.24:004.8

ГРНТИ 52.47.15, 28.23.15

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ РАННЕГО ВЫЯВЛЕНИЯ ПРИХВАТА БУРИЛЬНОЙ КОЛОННЫ

Т. И. Белая, А. О. Киямов

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Прихват бурильной колонны является одним из наиболее распространенных и дорогостоящих осложнений при строительстве нефтегазовых скважин. В настоящей работе рассматривается задача прогнозирования данного осложнения методами машинного обучения на основе высококачественных данных телеметрии. Задача формализована как бинарная классификация временных рядов с учителем. Проведен сравнительный анализ пяти алгоритмов: градиентного бустинга (XGBoost, LightGBM, CatBoost), случайного леса и автоэнкодера. Установлено, что алгоритмы LightGBM и XGBoost обеспечивают наилучшее сочетание точности, скорости вычисления прогноза и интерпретируемости модели. Полученные результаты подтверждают перспективность применения предиктивной аналитики для снижения непроизводительного времени при бурении.

прихват бурильной колонны, машинное обучение, геолого-технический контроль, градиентный бустинг

Строительство нефтегазовых скважин остается одной из рискованных и капиталоемких операций в нефтегазовой отрасли. Прихват бурильной колонны – полная потеря ее подвижности в стволе скважины – составляет более 25 % от общего объема непроизводительного времени (НПВ), а ежегодные потери отрасли превышают 250 миллионов долларов США [1]. Традиционные методы оценки риска опираются на ретроспективный анализ и не позволяют оперативно выявлять начинающиеся осложнения. В связи с этим актуальной задачей является разработка инструментов предиктивной аналитики, способных обрабатывать высококачественные данные поверхностных датчиков и выдавать вероятностную оценку риска в режиме реального времени.

Анализ промысловых данных позволяет выделить два основных механизма возникновения прихвата [1, 2, 3]. Дифференциальный прихват возникает вследствие прижатия бурильной колонны к проницаемой стенке скважины под действием перепада давления между буровым раствором и пластом, осложнение усугубляется высокой плотностью раствора с длительными остановками. Механический прихват обусловлен накоплением шлама, обвалами пород, набуханием глин и снижением выносящей

способности бурового раствора. Статистически прихваты фиксируются примерно при каждой третьей скважине: около 90 % случаев происходят либо при подъеме колонны, либо в период ее подвижности [1].

С развитием технологий машинного обучения задача прогнозирования прихвата стала формулироваться как классификация состояния бурового процесса по данным поверхностных датчиков [4, 5]. Методы обнаружения аномалий и кластерного анализа не позволяют однозначно интерпретировать выявленные отклонения как конкретный вид осложнений [5]. Таким образом, при наличии размеченных исторических данных обучение с учителем в постановке бинарной классификации остается наиболее методологически обоснованным подходом.

В рамках настоящего исследования задача сформулирована следующим образом: на вход модели поступают ряд данных телеметрии, целевая переменная принимает бинарное значение – наличие или отсутствие прихвата в заданном временном окне. Признаковое пространство сформировано на основе анализа физической природы осложнений и данных датчиков буровой установки. Все параметры доступны в режиме реального времени. Ключевые признаки систематизированы в таблице 1.

ТАБЛИЦА 1. Ключевые параметры для идентификации прихватов буровой колонны

Категория	Ключевые фичи	Важность
Механические нагрузки	Нагрузка на крюке, осевая нагрузка на долото, вес буровой колонны	Аномалии указывают на механический прихват
Крутящий момент	Момент на роторе, на долоте, верхнего привода	Спайки – признак дифференциального прихвата
Давления	Давление на стояке, дифференциальное давление	Избыток/падение – трение/закупорка
Скорости/проходка	Механическая скорость проходки, частота вращения, расход раствора	Замедление при высоком моменте – признак риска
Параметры бурового раствора	Прирост/убыль объема, расход на выходе, суммарная подача насоса	Связь с дифференциальным прихватом
Система автобурения	Параметры автобурения, индекс прихвата-скачка	Усиливают диагностический сигнал
Производные признаки	Удельная механическая энергия, время бурения на метр	Индикаторы снижения эффективности

С учетом структуры данных и требований к работе модели в режиме реального времени рассмотрены следующие алгоритмы. Источники отбирались по критериям применения МО для прогнозирования прихвата, наличия количественных метрик качества и публикации 2017-2026 годах в виде рецензируемой статьи или диссертации [6-10].

XGBoost – градиентный бустинг с регуляризацией. Обеспечивающий высокую точность на несбалансированных выборках, имеет встроенную обработку пропущенных значений, высокую скорость вычисления прогноза и поддерживает интерпретацию на основе значений SHAP (Shapley Additive exPlantation). Недостатки: чувствительность к настройке гиперпараметров, склонность к переобучению на зашумленных данных [7].

Случайный лес (Random Forest) – ансамбль решающих деревьев. Устойчивость к шуму, рост в интерпретации, хорошо работает с дисбалансом классов. Недостатки: высокое потребление памяти, низкая скорость вычисления прогноза на больших массивах данных [8].

LightGBM – оптимизированный бустинг с гистограммным подходом. Демонстрирует скорость обучения и вычисление прогноза в 2-10 раз выше, чем XGBoost и случайного леса, при существенно меньшем потреблении памяти. Эффективно работает с категориальными признаками. Недостатки: склонность к переобучению на малых выборках [9].

CatBoost – градиентный бустинг с автоматической обработкой категориальных признаков. Устойчив к переобучению, не требует предварительного кодирования категориальных переменных. Недостатки: уступает по скорости обучения XGBoost/LightGBM [10].

Автоэнкодер строится на принципе реконструкции: сеть обучается восстанавливать входные данные, а по величине ошибки восстановления делается вывод о наличии аномалии. Такой подход не требует размеченных примеров отклонений, что особенно полезно при малочисленных и разнородных случаях прихвата. Вместе с тем метод требователен к вычислительным ресурсам и уступает по устойчивости прямой классификации без тщательной настройки гиперпараметров [10].

Ввиду различий в наборах данных, геологических условиях и протоколах валидации прямое количественное сравнения алгоритмов ограничено. Тем не менее ключевые метрики, релевантные для задач мониторинга в режиме реального времени, обобщены в таблице 2.

ТАБЛИЦА 2. Сравнение алгоритмов машинного обучения

Модель	ROC-AUC	Точность	Precision	Recall	F1-мера	Набор данных/Регион
XGBoost	-	0.992	0.987	0.916	0.950	Месторождение Volve, Северное море, Норвегия
Random Forest	0.730	0.974	0.986	0.729	0.629	Индонезия
LightGBM	-	0.956	0.957	0.956	0.956	FORGE 16B(78)-32, США
CatBoost	1.00	0.980	0.990	0.990	0.990	Месторождение X
DL Autoencoder	0.958	0.991	0.971	0.913	0.942	Месторождение Volve, Северное море, Норвегия

Точность всех пяти моделей укладывается в диапазон 0,956 – 0,992, что может говорить об их сопоставимости. Однако при дисбалансе классов, характерном для данных о прихват, эта метрика недостаточно информативна. Так Random Forest при точности 0,974, модель показывает Recall всего 0,729 и F1-меру 0,629, а значит, значительная часть реальных прихватов остается необнаруженной. Столь же показателен и ее ROC-AUC (0,73), сочетание невысокого значения этого показателя с внешне хорошей точностью типично для случаев, когда точность обеспечивается за счет преобладающего класса, а не за счет способности модели различать классы. С точки зрения производственной безопасности определяющей метрикой является Recall, и здесь заметно превосходство CatBoost, LightGBM и XGBoost над Random Forest. Автоэнкодер по этому показателю также демонстрирует высокий результат, однако уступает алгоритмам градиентного бустинга. По F1-мере, лучший результат также показывают ансамбли градиентного бустинга.

Полученные данные позволяют заключить, что среди рассмотренных методов именно градиентный бустинг, прежде всего LightGBM и XGBoost, обеспечивает наиболее удачное сочетание точности, скорости инференса (0,5-5 мс) и интерпретируемости модели. По скорости обучения и вычисления прогноза LightGBM демонстрирует наилучшие результаты – в 2-10 раз быстрее XGBoost и случайного леса в 30-150 раз быстрее автоэнкодера [11]. Данное преимущество критически важно при обработке высокочастотных временных рядов в режиме реального времени. Низкое потребление LightGBM также является существенным фактором при развертывании модели в условиях ограниченных серверных или граничных вычислительных ресурсов. По интерпретируемости наиболее высокие показатели демонстри-

руют XGBoost, случайный лес и CatBoost: встроенные механизмы оценки важности признаков и значения SHAP позволяют инженеру-технологу понять, какие именно параметры бурового процесса вносят наибольший вклад в формирование оценки риска. Это особенно важно для внедрения системы в производственный процесс, где обоснованность прогноза не менее важна, чем его точность.

Задача раннего выявления прихвата бурильной колонны решается методами обучения с учителем, причем наилучший результат сочетание точности, скорости и интерпретируемости среди рассмотренных алгоритмов показывают модели градиентного бустинга. Для прогнозирования прихвата в режиме реального времени приоритетным следует считать LightGBM. CatBoost более уместен при работе с гетерогенными категориальными данными, а XGBoost там, где важна глубокая интерпретируемость модели. Окончательный выбор алгоритма должен опираться на валидацию данными целевого региона.

Список использованных источников

1. Kahdim Mahmood A.T., Assi A.H. A Comprehensive Review of the Pipe Sticking Mechanism in Oil Well Drilling Operations // *Journal of Engineering*. 2024. Vol. 30. N 11. PP. 50-70. DOI: 10.31026/j.eng.2024.11.04.
2. Каменских С. В. Прихваты бурильного инструмента: монография. – Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2023. 120 с.
3. Al-Shargabi M. A. T. S., Al-Musai A. H. A. Comparative Analysis of Programs for Assessing the Risk of Stuck Drill Pipes in an Oil and Gas Well. *Proceedings of the TPU Conference*. Tomsk, 2021. PP. 502–504.
4. Msahli A. Early Stuck Pipe Detection Based on Real-Time Data Analysis. Master thesis. Montanuniversität Leoben, 2017.
5. Xia B., Wang Y., Li Q., Song X., Zhu Z., Liu M., Yang Y. Research on Stuck Pipe Prediction Based on Supervised and Unsupervised Ensemble Learning // *Processes*. 2025. Vol. 13. N 10. Article 3309.
6. Kaid Aicouch M., Zerari F. Predicting Drilling Problems Using Machine Learning Techniques. Master thesis. Kasdi Merbah University Ouargla, 2025.
7. Muhtadlor R., Rosyid N. R., Fauziyyah A. K., Setiawan L. H. P., Saputra I., Stasa P., Benes F., Syafudin M., Alfian G. Web-Based Geothermal Drilling Stuck Pipe Prediction Using Decision Tree Algorithm // *IAES International Journal of Artificial Intelligence (IJ-AI)*. 2026. Vol. 15. N 1. PP. 604-614.
8. Iorkyaa A. J., Igbo E. F., James N.J. Supervised Learning Models for Detection of Kick and Stuck Pipe During Drilling Operations in Complex Formations // *Petroleum Science and Engineering*. 2025. Vol. 9. N 2. PP. 120–128.
9. Amanzhol E. Stuck Pipe Prediction in Deep Wellbores Drilled in Complex Evaporite Formations Using ML-Based Intelligent Classifiers. Master thesis. Nazarbayev University, 2025.

10. Al-Mamoori H. N., Tian J., Ma H. Stuck Pipe Detection in Oil and Gas Drilling Operations Using Deep Learning Autoencoder for Anomaly Diagnosis // Applied Sciences. 2025. Vol. 15. N 9. Article 5042.

11. Florek P., Zagdanski A. Benchmarking State-of-the-Art Gradient Boosting Algorithms for Classification. arXiv preprint arXiv:2305.17094. 2023.

COMPARATIVE ANALYSIS OF MACHINE LEARNING ALGORITHMS FOR EARLY DETECTION OF STUCK PIPE

Belaya T., Kiyamov A.

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

Stuck pipe is one of the most common and costly complications encountered during oil and gas well drilling. This paper considers the problem of predicting this complication using machine learning methods based on high-quality geological and technical monitoring data. The task is formulated as a supervised binary classification problem for time series. The task is formulated as five algorithms is carried out: gradient boosting (XGBoost, LightGBM, CatBoost), Random Forest, and autoencoder. It is established that LightGBM and XGBoost provide the best combination of accuracy, prediction speed, and model interpretability. The obtained results confirm the effectiveness of predictive analytics for reducing non-productive time during drilling.

Key words: stuck pipe, machine learning, geological and technical monitoring, gradient boosting

УДК 621.397.335

ГРНТИ 49.37.29

АНАЛИЗ ПОДХОДОВ К СИНХРОНИЗАЦИИ ДАННЫХ В ГИБРИДНЫХ СЕТЯХ СВЯЗИ

А. А. Березкин, А. А. Ченский

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В рамках развития сетей связи существует тенденция по переносу все большего количества вычислений к границе сети. При этом в сетях связи возникает большое количество узлов, на каждом из которых проводится обработка малого количества пользовательских запросов. Полоса пропускания, необходимая для синхронизации данных между данными узлами, существенно меньше, чем между узлами, на которых обрабатывается большое количество пользовательских запросов. В условиях существующей нестабильной внешнеполитической обстановки целесообразно применять гибридные сети для связи между такими узлами. Это позволит обеспечить отказоустойчивость вычислительной инфраструктуры. В настоящей работе проводится анализ подходов к синхронизации данных в гибридных сетях связи по типам данных. В результате анализа показано, что наибольшее количество научно-технических публикаций посвящено синхронизации обобщенных, табличных и мультимедиа данных. Синхронизация документарных, звуковых, визуальных, видео- и прочих данных изучена в литературе меньше.

гибридная сеть связи, гибридная орбитально-наземная сеть связи, ГОНСС, синхронизация данных, синхронизация видеоданных, классификация, анализ литературы, обзор литературы

Введение

В середине 20-х годов XXI века гибридные сети связи рассматриваются как перспективные сети связи, которые повысят доступность и отказоустойчивость оказания сетевых услуг. Так, согласно Стратегии развития отрасли связи до 2035 года, утвержденной постановлением правительства от 24 ноября 2023 года № 3339-р, разновидность гибридных сетей, гибридные орбитально-наземные сети связи обеспечат связь на всей территории Российской Федерации, включая Арктическую зону. В частности, это позволит управлять беспилотными воздушными судами от первого лица или синхронизировать данные по всей территории Российской Федерации.

Существует также тенденция децентрализации вычислительных ресурсов и как следствие разгрузки крупных центров обработки данных (ЦОД).

В рамках этого в стратегии предполагается создание большого количества так называемых «микро-ЦОД» и «мини-ЦОД» на периферии сети. К 2035 году процентная доля вычислений, которая выполняется на границе сети, согласно Стратегии развития отрасли связи до 2035 года, составит до 30 %.

Каналы связи между малыми ЦОД, а также между клиентами и малыми ЦОД не требует такой большой пропускной способности, как у больших ЦОД, и могут организовываться через гибридные сети связи. Это обеспечит их продолжение их работоспособности в случае повреждения инфраструктуры наземных сетей.

Классификация синхронизации данных

Синхронизация данных в гибридной сети связи – это сетевая услуга, целью которой является обеспечение унификации некоторых данных между двумя и более узлами сети. По типу данных синхронизация данных делится на обобщенную и специализированную.

Обобщенная синхронизация данных – это синхронизация файлов любого типа между узлами сети. Специализированная синхронизация данных – это синхронизация данных определенного вида.

Специализированная синхронизация данных, соответственно, делится на: синхронизацию документарных данных, синхронизацию звуковых данных, синхронизацию визуальных данных, синхронизацию видеоданных, синхронизацию мультимедиа, синхронизацию табличных данных и синхронизацию прочих данных.

Научно-техническая разработанность синхронизации данных

Характерной особенностью публикаций по теме синхронизации данных является в большей степени практическая направленность. Существенная часть публикаций по этой теме представлена в так называемых «хищнических журналах», исключенных из Российского индекса научного цитирования (РИНЦ). Данные публикации, тем не менее, продолжают выводиться по поиске в электронной научной библиотеке eLIBRARY и отчасти продолжают индексироваться в РИНЦ. В качестве характерных примеров подобных публикаций можно выделить работы [1, 2], относящихся к обобщенной синхронизации. Данные публикации представляют собой краткое руководство по использованию двух приложений для синхронизации данных по USB-кабелю, не имея ни научной, ни технической новизны. Списки литературы в данных публикациях составлены произвольно без упоминания ис-

точников в самой работе. При этом работа [2] является точной копией работы [1].

Обобщенная синхронизация данных рассматривается в ряде работ, большая часть которых имеет практическую направленность [3, 4]. В большинстве работ рассматриваются практические аспекты синхронизации данных на мобильных устройствах. Так в работе [3] рассматриваются протоколы синхронизации данных между компьютером и карманным портативным компьютером с операционной системой Palm OS: Palm HotSync, Intellisync, SyncML, CPISync. В статье [4] рассматриваются стандарты Open Mobile Alliance: Data synchronization 1.1.2, 1.2.1, 1.2.2 и 2.0. Основные виды синхронизации между клиентом и сервером: односторонняя и двухсторонняя. Существует две основных разновидности обобщенной синхронизации данных: медленная и быстрая. При медленной синхронизации отправляются все файлы с поатрибутным сравнением. При быстрой отправляются только изменения файлов.

При синхронизации документарных данных выполняется синхронизация данных в определенных документарных форматах. Это могут быть документы doc, docx, xls, xlsx и другие. Данная разновидность синхронизации данных применяется в документообороте. Публикации по теме синхронизации документарных данных носят преимущественно практическую направленность [5-7]. В данных публикациях рассматривается архитектура и разработка систем синхронизации документооборота в системах документационного обеспечения управления и системах управления ресурсами предприятия.

Синхронизация табличных данных – это синхронизация данных таблиц в распределенных базах данных. Существует значительное количество публикаций по синхронизации табличных данных [8-11]. В работе [7] упомянуты средства, которые позволяют синхронизировать данные БД: «Navicat Data Modeler», «Altova DatabaseSpy», «RedGate SQL Compare». [8] – это обзорная статья, в которой рассматривается технология GDP (global data synchronization). Даная технология является синхронизацией данных в реальном времени о продукции компаний. Синхронизация таблиц состояний каналов в рамках одной зоны протокола динамической маршрутизации OSPF между сетевыми узлами также может рассматриваться как синхронизация табличных данных [9]. В статье [10] решается задача по синхронизации корпоративных данных между подразделениями компании. Для этого проектируется система, основанная на веб приложении. Последовательно составля-

ются диаграммы: прецедентов, размещения, последовательностей действий, активности, компонентов. Синхронизация выполняется в автоматизированном режиме оператором.

При синхронизации звуковых данных выполняется синхронизация звуковых, включая голосовых, данные. К этим данным относятся, в частности, файлы форматов ogg, wav, mp3. При этом как отдельное направление в научной литературе синхронизация звуковых данных не рассматривается. Существуют, однако, смежные работы [11, 12]. Так в работе [11] рассматриваются методы синхронизации текста и озвучки электронных книг, а в статье [12] – синхронизация жестов и просодий.

При синхронизации визуальных данных синхронизируются данные изображений. Эти данные включают в том числе файлы форматов jpg, png, bmp. В научно-технической литературе под синхронизацией визуальных данных понимается объединение множества изображений, относящихся к одной сцене [13-16]

При синхронизации видеоданных выполняется синхронизация данных видео – последовательности кадров видеопотока. К файлам данного вида данных относятся в том числе mov, avi, mpg. В научных работах данная разновидность синхронизации рассматривается незначительно в контексте создания объединенных изображений из частей [17, 18]. Тем не менее, синхронизация видеопотока с камер видеонаблюдения или беспилотных воздушных судов [19, 20] также относится к данному виду синхронизации в широком смысле.

Синхронизация мультимедиа – это разновидность синхронизации, широко используемая в телеконференциях, при которой выполняется синхронизация как видеоданных, так и звуковых данных. Методы синхронизации мультимедиа в гетерогенных конференциях, такие как применение взаимокорреляционной функции или встраивании звуковых данных в видеопоток, широко рассматриваются в зарубежных работах [21-24]

Существует также синхронизация данных прочих видов [25-29]. Так в статье [25] рассматривается синхронизация данных с сенсоров в ADAS (advanced driver assistance system – продвинутая система помощи водителю). В работе [26] рассматривается синхронизация данных, поступающих в систему релейной защите с микропроцессорным устройством, установленную на электроэнергетическом объекте. В тезисах для конференции [27] обозначается проблема синхронизации данных метеорологических наблюдений в инфракрасном диапазоне и сверхвысокочастотном радиодиапазоне. Дру-

гим примером синхронизации данных прочих видов может рассматриваться синхронизация данных с беспроводной сенсорной сети [28, 29].

Заключение

В научно-технической литературе наиболее разработана синхронизация: обобщенная, табличных данных, мультимедиа. При этом в области обобщенной синхронизации наблюдается наибольшее количество низкокачественных публикаций в «хищнических журналах». Среднюю представленность в научно-технической литературе имеют направления синхронизации: документарной, прочей. Малую представленность в литературе имеет синхронизация звуковых, визуальных и видеоданных именно как специализированная синхронизация определенных типов данных между узлами сети. Данные направления в некоторой степени рассматриваются в литературе как объединение данных, относящихся к одному объекту.

Публикации в научно-технической литературе, в которых рассматривается проблема синхронизации данных, делятся на: публикации по проектированию и разработке программных систем [5-7, 10]; обзорные публикации [3, 4, 8, 12, 13, 18]; публикации по новым методам синхронизации [11, 14-17, 19-27]; практические руководства [1, 2].

Научная статья подготовлена в рамках прикладных научных исследований СПбГУТ, регистрационный номер 1025040100073-3-2.2.4;2.2.6;2.2.5 в ЕГИСУ НИОКТР.

Список используемых источников

1. Дзюба Я. В., Панченко В. А. Синхронизация данных на ПК и смартфонах // Совершенствование методологии познания в целях развития науки: сборник статей Международной научно-практической конференции: в 2 частях, Уфа, 28 октября 2017 года. Часть 2. 2017. С. 16-19.
2. Галушка В. В., Дзюба Я. В., Панченко В. А. Синхронизация данных на ПК и смартфонах // Вестник современных исследований. 2018. № 11.1(26). С. 244-246.
3. Agarwal S., Starobinski D., Trachtenberg A. On the scalability of data synchronization protocols for PDAs and mobile devices // IEEE network. 2002. Т. 16. №. 4. С. 22-28.
4. Демиш В. О., Пищик Б. Н. Синхронизация данных на мобильных платформах // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. 2013. Т. 11. №. 4. С. 46-58.
5. Шилин А. Н., Юрчик П. Ф., Остроух А. В. Синхронизации данных в системе управления ресурсами предприятия // Международный журнал экспериментального образования. 2015. №. 3-4. С. 398-401.
6. Волчков Д. В., Сурпин В. П. Разработка механизма синхронизации данных в распределенных системах документационного обеспечения управления // Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2011): материалы пятой международной конференции, Москва, 03–05 октября 2011 года. Том 2. 2011. С. 221-224.

7. Вишняков Ю. Д., Печенин В. А. Разработка концепции системы синхронизации данных в производстве // Всероссийский научно-технический форум по двигателям и энергетическим установкам имени НД Кузнецова: сб. докл. всерос. науч.-техн. форума. 2024. С. 10-11.
8. Nakatani K., Chuang T. T., Zhou D. Data synchronization technology: standards, business values and implications // Communications of the Association for Information Systems. 2006. Т. 17. №. 1. С. 44.
9. Цветков В. Ю., Волков К. А. Протоколы внутренней маршрутизации: OSPF и EIGRP: учеб.-метод. пособие. Минск: БГУИР, 2017. 72 с.
10. Мурлин А. Г., Мурлина В. А., Янаева М. В., Косолапова Е. В. Разработка технологии синхронизации данных в системе территориально-распределенного программного комплекса // Вестник НГИЭИ. 2018. № 12(91). С. 16-29.
11. Мишустин В. А., Иваница С. В. Исследование способов синхронизации текстовой и аудио информации для мобильных приложений // Информатика и кибернетика. 2021. № 3(25). С. 32-36.
12. Николаева Ю. В. Синхронизация просодии и жестов по времени и направлению // Язык-Музыка-Жест: информационные перекрестки: сборник материалов международной научной конференции, Санкт-Петербург, 18–20 апреля 2024 года. Санкт-Петербург: ООО "Скифия-принт", 2024. С. 56-58.
13. Зубарев А. В., Фёдорова А. А., Чернышев В. В., Варламов Г. В., Соколова Н. А., Фёдорова Н. А. Применение эхоконтрастных препаратов в клинике и перспективы синхронизации УЗИ, КТ- и МРТ-изображений (собственный опыт и обзор литературы) // Медицинская визуализация. 2015. № 1. С. 94-114.
14. Аксенов О. Ю. Совмещение изображений // Цифровая обработка сигналов. 2005. №. 3. С. 51-55.
15. Архипов О. П., Архипов П. О., Сидоркин И. И. Вариант создания локальной системы координат для синхронизации изображений выбранных снимков // Информатика и ее применения. 2016. Т. 10. № 3. С. 91-97.
16. Андреев С. В., Галактионов В. А., Денисов Е. Ю., Кирилов Н. Е. Синтез фотореалистичных трехмерных изображений в современных системах презентаций // Программные продукты и системы. 2007. № 3. С. 11.
17. Дрижук Д. Д., Пойда А. А., Годунов А. И. Синхронизация гигапиксельных видеопотоков на видеостенах // Вычислительные методы и программирование. 2013. Т. 14. № 2. С. 35-42.
18. Валицкая Н. С., Власюк Н. С. Методы синхронизации потоков в видеоинформационных системах // Телекоммуникации и информационные технологии. 2019. Т. 6. № 2. С. 51-57.
19. Березкин А. А., Ченский А. А., Киричек Р. В., Захаров А. А. Исследование конфигураций нейросетевых кодеков для адаптивной системы сжатия кадров FPV-видеопотока при управлении беспилотными системами. Часть I. Методика // Электро-связь. 2024. № 9. С. 42-51.
20. Березкин А. А., Ченский А. А., Киричек Р. В., Захаров А. А. Исследование конфигураций нейросетевых кодеков для адаптивной системы сжатия кадров FPV-видеопотока при управлении беспилотными системами. Часть II. Эксперимент // Электро-связь. 2024. № 10. С. 59-69.
21. Song X., Li W., Li B., Cheng X., Dou C. Optimization of Real-Time Data Transmission and Synchronization Mechanism in Audio and Video Conferencing Systems // 2024 International Conference on Telecommunications and Power Electronics (TELEPE). IEEE, 2024. С. 736-741.

22. Lin H. P., Hsieh H. Y. On using digital speech processing techniques for synchronization in heterogeneous teleconferencing // International Conference on Heterogeneous Networking for Quality, Reliability, Security and Robustness. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009. С. 679-695.
23. Yang M., Bourbakis N., Chen Z., Trifas M. An efficient audio-video synchronization methodology // 2007 IEEE International Conference on Multimedia and Expo. IEEE, 2007. С. 767-770.
24. Xie Y., Liu C., Lee M. J., Saadawi T. N. Adaptive multimedia synchronization in a teleconference system // Multimedia Systems. 1999. Т. 7. №. 4. С. 326-337.
25. Kaempchen N., Dietmayer K. Data synchronization strategies for multi-sensor fusion // Proceedings of the IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems. 2003. Т. 85. №. 1. С. 1-9.
26. Петров К. Э., Трелюдова О. А., Майзель А. В. Регистрация и синхронизация данных, получаемых асинхронно // Неделя науки СПбПУ: материалы научной конференции с международным участием, Санкт-Петербург, 13–19 ноября 2017 года / Институт физики, нанотехнологий и телекоммуникаций. Санкт-Петербург: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого", 2017. С. 145-146.
27. Саворский В. П. Синхронизация данных ИК и СВЧ наблюдений при гарантированном обнаружении мезомасштабных конвективных комплексов // Материалы 21-й Международной конференции "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса", Москва, 13–17 ноября 2023 года. Москва: Институт космических исследований Российской академии наук, 2023. С. 47.
28. Лихтциндер Б. Я., Киричек Р. В., Федотов Е. Д. и др. Беспроводные сенсорные сети. Москва: Научно-техническое издательство "Горячая линия-Телеком", 2020. 236 с.
29. Pirmagomedov R. et al. UAV-based gateways for wireless nanosensor networks deployed over large areas // Computer Communications. 2019. Т. 146. С. 55-62.

DATA SYNCHRONIZATION APPROACHES ANALYSIS IN HYBRID NETWORKS

Chenskiy A., Berezkin A.

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

During the development of telecommunication networks, there is a tendency of calculation transfer towards the edge of the networks. This requires a lot of network hosts, which process a small number of users' requests. The service of data synchronization between these hosts requires less bandwidth compared to the hosts, which process a big number of users' requests. Amidst the current unstable political environment, it is advisable to utilize hybrid networks for the data synchronization service. It will ensure the fail-safety of the computing infrastructure. The present paper elaborates scientifically on the data synchronization problem for various data types. The analysis showed that most scientific and technical publications are devoted to generic, tabular, and multimedia data. Documentary, sound, visual, video, and other data synchronizations are studied in the scientific and technical literature to a lesser extent.

Key words: hybrid network, hybrid orbital-terrestrial network, HOTN, data synchronization, video data synchronization, classification, literature analysis, literature review

УДК 004.415.2:004.75
ГРНТИ 50.41.25

РАЗРАБОТКА СЕРВИСА СТАНДАРТИЗИРОВАННОЙ ГЕНЕРАЦИИ МИКРОСЕРВИСОВ И ИНТЕГРАЦИИ В CI/CD-КОНТУР

М. А. Бирюков, М. С. Боровских

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Статья посвящена разработке сервиса стандартизированной генерации микросервисов и автоматизации их первичной интеграции в контур непрерывной интеграции и поставки. Актуальность работы обусловлена трудоемкостью ручной подготовки новых сервисов, риском ошибок конфигурации и неоднородностью проектных каркасов. Описано решение, объединяющее пользовательский интерфейс, серверную подсистему, хранилище данных, асинхронную обработку задач и модули взаимодействия с корпоративной инфраструктурой. Приведены архитектура сервиса, сценарий публикации исходного кода и создания заданий сборки и развертывания. Результаты апробации показывают сокращение времени подготовки типового микросервиса и уменьшение числа ручных операций.

генерация микросервисов, CI/CD, Cookiecutter, GitLab, Jenkins, Spring Boot, Kubernetes, автоматизация, стандартизация, асинхронная обработка

В современных корпоративных информационных системах микросервисная архитектура позволяет развивать и поставлять компоненты независимо. Однако ее применение повышает требования к единообразию инженерных практик: новый сервис должен иметь согласованную структуру проекта, конфигурации сборки и контейнеризации, средства наблюдаемости и настройки интеграции с инфраструктурой разработки [1].

Ручная подготовка микросервиса включает повторяющиеся действия: выбор эталонного проекта, создание файлового каркаса, замену имен, настройку зависимостей, формирование Docker- и Helm-артефактов, публикацию исходного кода и создание типовых заданий сборки и развертывания. Разрозненные шаблоны и локальные сценарии автоматизации сокращают часть затрат, но не обеспечивают централизованное хранение истории операций и контроль состояния отдельных шагов.

Для устранения указанных ограничений разработан сервис стандартизированной генерации микросервисов. В его основе лежит управляемая задача, которая объединяет формирование проектного каркаса и первичную интеграцию результата в корпоративный контур разработки. Общая архитектура решения представлена на рис. 1.

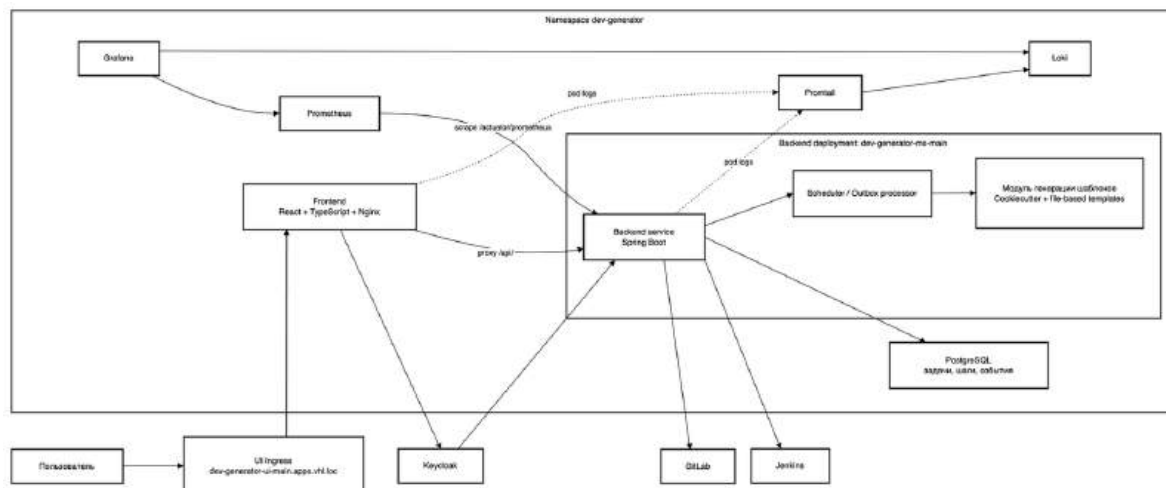


Рис. 1. Архитектура сервиса стандартизированной генерации микросервисов

Точкой входа является frontend-приложение, в котором пользователь выбирает шаблон, заполняет параметры и запускает генерацию. Backend-сервис на основе Spring Boot сохраняет задачу, шаги и события в PostgreSQL, после чего возвращает идентификатор задачи без ожидания завершения длительных операций. Для формирования каркаса используется Cookiecutter, позволяющий параметризовать структуру каталогов, имена файлов и содержимое конфигураций [2, 3]. Базовая последовательность интеграции приведена на рис. 2.

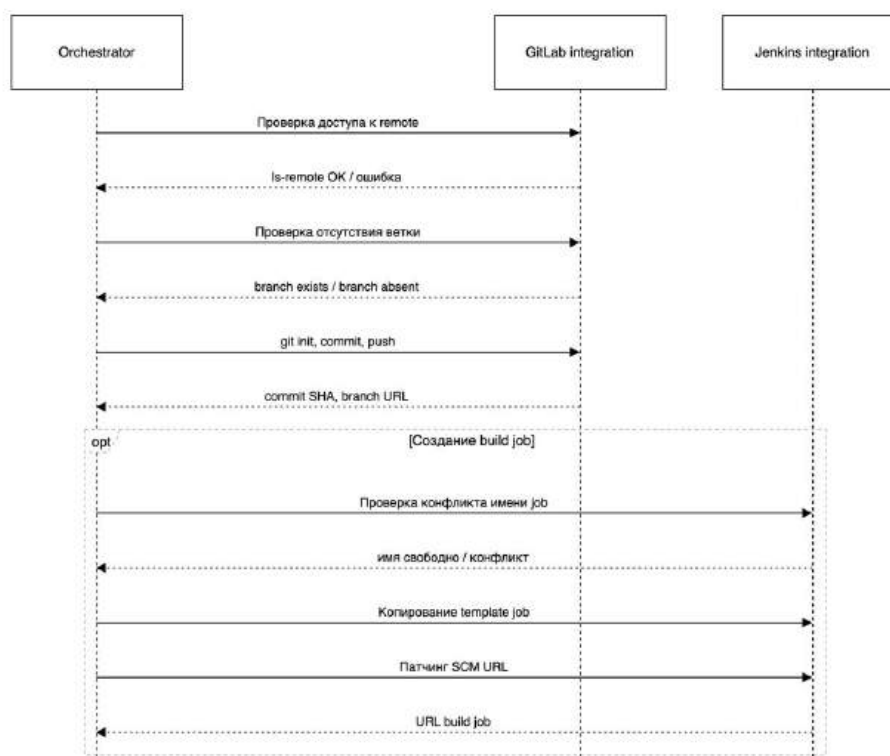


Рис. 2. Базовая последовательность интеграции с GitLab и Jenkins

Асинхронная обработка реализована через scheduler/outbox-контур и оркестратор шагов. Такой подход обеспечивает восстановление обработки после перезапуска приложения, повторные попытки для временных ошибок и прозрачное отображение текущего статуса. Интеграционный сценарий включает проверку доступа к удаленному репозиторию, публикацию новой ветки в GitLab и создание типовых заданий Jenkins.

Перед публикацией сервис проверяет доступ к репозиторию и отсутствие целевой ветки. После успешного выполнения сохраняются идентификатор фиксации и ссылка на ветку. При включенном сценарии сборки backend создает задание Jenkins на основе шаблона и подменяет адрес репозитория. Для развертывания дополнительно формируются preset-ветка и deploy job. Такой механизм использует существующие возможности GitLab и Jenkins [4, 5, 6] и исключает ручную настройку через пользовательские интерфейсы внешних систем.

Для повышения эксплуатационной надежности ошибки классифицируются как временные и невозможные. Временная ошибка переводит событие в ожидание повторной обработки, а невозможная завершает задачу со статусом FAILED. Технические учетные данные не сохраняются в прикладной базе данных и не возвращаются пользователю; они передаются через внешние секреты среды развертывания. Наблюдаемость обеспечивается структурированными журналами, метриками Spring Boot Actuator и стендом на основе Prometheus, Loki и Grafana.

Работоспособность сервиса подтверждена модульными и интеграционными тестами backend-компонентов, а также стендовой проверкой полного маршрута генерации. Верифицированы создание задачи, последовательное выполнение шагов, публикация ветки, создание заданий сборки и развертывания, обработка повторяемых ошибок и отображение результатов пользователю. Количественная оценка практического эффекта приведена в таблице 1.

Сопоставление показывает, что время подготовки типового микросервиса сократилось на 83–89 %, а автоматизация охватывает 10 из 13 характерных ручных шагов. Полученный результат относится к начальному инфраструктурно-шаблонному этапу и не исключает последующую прикладную разработку. Разработанный сервис повышает воспроизводимость процесса, снижает зависимость результата от опыта конкретного специалиста и упрощает контроль первичной интеграции нового микросервиса.

ТАБЛИЦА 1. Практический эффект автоматизации подготовки микросервиса

Показатель	Ручной сценарий	С использованием сервиса
Время подготовки опытным разработчиком	60–90 мин	около 10 мин
Время подготовки новым сотрудником	120–180 мин	около 10 мин
Число характерных ручных шагов	13	3
Соответствие выбранным корпоративным критериям	зависит от исполнителя	100 %

Таким образом, реализован сервис, объединяющий генерацию проектного каркаса, публикацию исходного кода и подготовку типовых заданий непрерывной интеграции и поставки. Дальнейшее развитие решения связано с расширением набора шаблонов, автоматизацией подготовки базы данных и развитием административных функций.

Список используемых источников

1. Fowler M., Lewis J. Microservices. URL: <https://martinfowler.com/articles/microservices.html> (дата обращения: 12.03.2026).
2. Cookiecutter Documentation. URL: <https://cookiecutter.readthedocs.io/> (дата обращения: 18.03.2026).
3. Cookiecutter: репозиторий проекта. URL: <https://github.com/cookiecutter/cookiecutter> (дата обращения: 19.03.2026).
4. Jenkins User Documentation. URL: <https://www.jenkins.io/doc/> (дата обращения: 29.03.2026).
5. Jenkins Pipeline Documentation. URL: <https://www.jenkins.io/doc/book/pipeline/> (дата обращения: 04.04.2026).
6. GitLab Docs. CI/CD pipelines. URL: <https://docs.gitlab.com/ci/pipelines/> (дата обращения: 09.04.2026).

DEVELOPMENT OF A STANDARDIZED MICROSERVICE GENERATION SERVICE AND INTEGRATION INTO A CI/CD PIPELINE

Borovskikh, M., Birukov, M.

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

The paper is devoted to the development of a service for standardized microservice generation and automation of initial integration into a continuous integration and delivery pipeline. The relevance of the work is driven by the labor intensity of manual project setup, config-

uration risks, and inconsistency of generated service structures. The proposed solution combines a user interface, a backend subsystem, persistent task storage, asynchronous processing, and integration modules for corporate infrastructure. The paper presents the service architecture, source code publication workflow, and automated creation of build and deployment jobs. Verification results demonstrate a substantial reduction in preparation time and the number of manual operations required to initialize a typical microservice.

Key words: *microservice generation, CI/CD, Cookiecutter, GitLab, Jenkins, Spring Boot, Kubernetes, automation, standardization, asynchronous processing*

УДК 004.056.53

ГРНТИ 81.93.29

ГИБРИДНАЯ МОДЕЛЬ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ АНОМАЛИЙ СЕТЕВОГО ТРАФИКА В СИСТЕМАХ СЕТЕВОГО ОБНАРУЖЕНИЯ И РЕАГИРОВАНИЯ

М. А. Бирюков, З. В. Ким

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В статье рассматривается задача автоматизированного обнаружения аномалий сетевого трафика средствами машинного обучения. Обосновывается необходимость перехода от сигнатурных методов к поведенческому анализу, способному выявлять ранее не наблюдавшиеся атаки. Описывается архитектура гибридной модели, объединяющей детектор новизны на основе изолирующего леса и классификатор атак на основе градиентного бустинга деревьев решений. Анализируются проблема сильного дисбаланса классов и устойчивость предложенного решения к состязательным возмущениям входных данных. Приводятся результаты экспериментальной оценки на эталонном наборе сетевых данных, а также описывается подсистема интерактивной визуализации выявленных угроз для аналитиков информационной безопасности.

анализ сетевого трафика, машинное обучение, обнаружение аномалий, системы NDR, гибридные модели, интерактивная визуализация, Python, XGBoost, Isolation Forest, состязательные атаки

Введение

Стремительный рост объема и структурной сложности сетевого трафика, сопровождающийся повышением изощренности компьютерных атак, обуславливает потребность в интеллектуальных средствах мониторинга информационной безопасности. Традиционные сигнатурные системы обнаружения вторжений надежно распознают известные угрозы, однако оказываются неэффективными против атак нулевого дня, для которых сигнатуры еще не сформированы [1]. В связи с этим все большее распространение получают системы класса NDR (Network Detection and Response), опирающиеся на поведенческий анализ и методы машинного обучения. Целью настоящей работы является теоретическое обоснование и описание архитектуры гибридной модели машинного обучения, предназначенной для обнаружения и категоризации аномалий сетевого трафика.

Теоретические основы анализа сетевого трафика

Под анализом сетевого трафика понимается процесс наблюдения, агрегации и интерпретации потоков данных, циркулирующих в вычислительной сети. В качестве базовой единицы наблюдения, как правило, выступает сетевой поток, характеризуемый набором статистических признаков: длительностью соединения, числом и размером переданных пакетов, распределением межпакетных интервалов, набором установленных флагов протокола и долей служебного трафика [2]. Системы NDR агрегируют такие признаки в реальном времени и сопоставляют наблюдаемое поведение с моделью нормального функционирования сети, фиксируя статистически значимые отклонения как потенциальные инциденты.

Принципиальное преимущество поведенческого подхода состоит в способности обнаруживать угрозы, не имеющие заранее описанных признаков. Вместе с тем такой подход порождает повышенную долю ложноположительных срабатываний, что увеличивает нагрузку на аналитиков и требует тщательной настройки порогов и механизмов агрегации решений.

Подходы машинного обучения к обнаружению аномалий

Методы машинного обучения, применяемые в задачах обнаружения аномалий, традиционно разделяют на обучение с учителем и обучение без учителя. Модели с учителем, такие как градиентный бустинг деревьев решений XGBoost, демонстрируют высокую точность классификации известных категорий атак, однако их качество резко снижается при появлении ранее не встречавшихся образцов и при сильном дисбалансе классов, типичном для сетевых данных [3]. Модели без учителя, например изолирующий лес (Isolation Forest), напротив, не требуют размеченных данных и хорошо выявляют новизну, но не способны самостоятельно определять категорию выявленной угрозы [1].

Дисбаланс классов представляет собой одну из ключевых трудностей: доля вредоносного трафика в реальных сетях обычно составляет доли процента, вследствие чего модель, формально оптимизирующая долю верных решений, склонна игнорировать редкий, но критически важный класс атак [4]. Для объективной оценки качества в условиях дисбаланса применяется F_1 -мера, представляющая собой гармоническое среднее точности P и полноты R :

$$F_1 = \frac{2PR}{P+R}, \quad (1)$$

где точность P характеризует долю истинных срабатываний среди всех положительных решений модели, а полнота R – долю обнаруженных атак среди всех фактически присутствовавших. Дополнительно используется показатель ROC-AUC, устойчивый к смещению порога принятия решения.

Архитектура предлагаемой гибридной модели

Предлагаемая архитектура объединяет сильные стороны обоих классов методов и нивелирует их недостатки. Структурная схема модели приведена на рисунке 1. Входной сетевой трафик поступает в высокопроизводительный конвейер обработки, выполняющий нормализацию, агрегацию потоков и извлечение признаков. Далее поток признаков параллельно направляется в две ветви: детектор новизны на основе изолирующего леса, ответственный за выявление аномального поведения без опоры на разметку, и классификатор атак на основе градиентного бустинга, определяющий конкретную категорию угрозы.

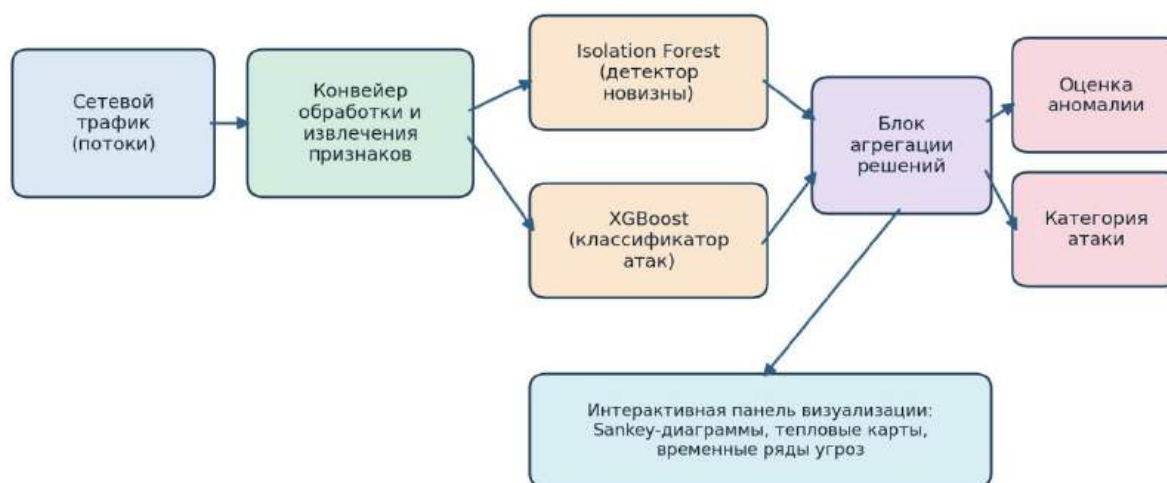


Рис. 1. Структурная схема гибридной модели обнаружения аномалий

Решения обеих ветвей объединяются в блоке агрегации, который формирует итоговую оценку аномальности и, при ее подтверждении, категорию атаки. Такое разделение функций позволяет одновременно обнаруживать неизвестные угрозы и сохранять интерпретируемую классификацию известных типов атак.

Устойчивость к состязательным атакам

Отдельное внимание в работе уделено устойчивости модели к состязательным атакам уклонения, при которых злоумышленник вносит малые целенаправленные возмущения в признаки трафика с целью обойти детектор. В качестве модели угроз рассматривался метод быстрого знакового градиента FGSM [5]. Экспериментально установлено, что разнесение функций по двум независимым ветвям существенно повышает робастность: возмущение, рассчитанное против одной ветви, не переносится напрямую на другую, вследствие чего падение полноты обнаружения у гибридной модели оказывается заметно меньшим, чем у монолитного классификатора.

Повышенная устойчивость изолирующего леса к рассматриваемой атаке объясняется природой самого метода. Атака FGSM формирует возмущение по знаку градиента функции потерь по входным признакам и потому применима лишь к дифференцируемым моделям. Изолирующий лес строится как ансамбль деревьев изоляции со случайными осевыми разбиениями признакового пространства, а его оценка аномальности является кусочно-постоянной функцией входа и не имеет информативного градиента. Вследствие этого возмущения, рассчитанные против дифференцируемого градиентного бустинга, не переносятся на ветвь изолирующего леса, и блок агрегации сохраняет способность фиксировать атаку даже при успешном уклонении от классификатора.

Интерактивная визуализация результатов

Завершающим звеном архитектуры выступает подсистема интерактивной визуализации, предназначенная для поддержки работы аналитиков. Она включает диаграммы Санкей, отображающие структуру потоков между подсетями, тепловые карты распределения аномалий по сегментам сети и временные ряды выявленных угроз в разрезе категорий атак. Подобное представление сокращает время реакции на инцидент и снижает когнитивную нагрузку на оператора центра мониторинга безопасности.

Результаты экспериментальной оценки

Экспериментальная проверка проводилась на эталонном наборе сетевых данных CIC-IDS2017 в условиях сильного дисбаланса классов [6]. Сравнительные характеристики монолитного классификатора и предложенной гибридной модели приведены в таблице 1.

ТАБЛИЦА 1. Сравнение характеристик моделей обнаружения аномалий

Модель	F1-мера	ROC-AUC	Падение полноты при FGSM, п.п.
Isolation Forest	0,52	0,88	19
Монолитный XGBoost	0,84	0,98	34
Гибридная модель	0,86	0,99	12

Как видно из таблицы 1, изолирующий лес как самостоятельный детектор обеспечивает лишь умеренное качество классификации (F1-мера 0,52 и ROC-AUC 0,88), что объясняется отсутствием разметки и невозможностью различать категории атак, однако демонстрирует меньшую чувствительность к состязательным возмущениям (падение полноты 19 процентных пунктов) в силу недифференцируемости деревьев изоляции. Гибридная модель объединяет преимущества обоих подходов и обеспечивает обнаружение атак с F1-мерой 0,86 и ROC-AUC 0,99, а падение полноты обнаружения при состязательных возмущениях не превышает 12 процентных пунктов против 34 процентных пунктов у монолитного решения. Полученные результаты подтверждают как высокое качество классификации, так и повышенную устойчивость предложенной архитектуры.

Заключение

В работе обоснована и описана архитектура гибридной модели машинного обучения для обнаружения аномалий сетевого трафика, объединяющая детектор новизны и классификатор атак с последующей агрегацией решений. Показано, что подобное разделение функций повышает как качество обнаружения в условиях дисбаланса классов, так и устойчивость к состязательным атакам уклонения. Практическая значимость результатов состоит в автоматизации выявления инцидентов информационной безопасности и снижении нагрузки на аналитиков, что делает решение применимым для защиты корпоративных сетей и объектов критической инфраструктуры. Перспективным направлением развития является интеграция механизмов онлайн-обучения для адаптации моделей к новым типам угроз в реальном времени.

Список используемых источников

1. Liu F. T., Ting K. M., Zhou Z.-H. Isolation Forest // Proceedings of the 2008 Eighth IEEE International Conference on Data Mining (ICDM 2008), Pisa, Italy, 15-19 December

2008. Los Alamitos, CA: IEEE Computer Society, 2008. PP. 413–422. DOI: 10.1109/ICDM.2008.17. URL: <https://doi.org/10.1109/ICDM.2008.17> (дата обращения: 15.07.2026).

2. Sperotto A., Schaffrath G., Sadre R., Morariu C., Pras A., Stiller B. An Overview of IP Flow-Based Intrusion Detection // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2010. Vol. 12. N 3. PP. 343–356. DOI: 10.1109/SURV.2010.032210.00054. URL: <https://doi.org/10.1109/SURV.2010.032210.00054> (дата обращения: 15.07.2026).

3. Chen T., Guestrin C. XGBoost: A Scalable Tree Boosting System // Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD '16), San Francisco, CA, USA, 13–17 August 2016. New York: ACM, 2016. P. 785–794. DOI: 10.1145/2939672.2939785. URL: <https://doi.org/10.1145/2939672.2939785> (дата обращения: 15.07.2026).

4. Зуев В. Н. Обнаружение аномалий сетевого трафика методом глубокого обучения // Программные продукты и системы. 2021. Т. 34, № 1. С. 91–97. DOI: 10.15827/0236-235X.133.091-097. URL: <https://swsys.ru/index.php?page=article&id=4784> (дата обращения: 15.07.2026).

5. Goodfellow I. J., Shlens J., Szegedy C. Explaining and Harnessing Adversarial Examples // 3rd International Conference on Learning Representations (ICLR 2015), San Diego, CA, USA, May 7–9, 2015: Conference Track Proceedings / eds. Y. Bengio, Y. LeCun. 2015. 11 p. URL: <https://arxiv.org/abs/1412.6572> (дата обращения: 15.07.2026).

6. Sharafaldin I., Habibi Lashkari A., Ghorbani A. A. Toward Generating a New Intrusion Detection Dataset and Intrusion Traffic Characterization // Proceedings of the 4th International Conference on Information Systems Security and Privacy (ICISSP 2018), Funchal, Madeira, Portugal, 22–24 January 2018. Setubal: SciTePress, 2018. Vol. 1. P. 108–116. DOI: 10.5220/0006639801080116. URL: <https://doi.org/10.5220/0006639801080116> (дата обращения: 15.07.2026).

HYBRID MACHINE LEARNING MODEL FOR DETECTING NETWORK TRAFFIC ANOMALIES IN NETWORK DETECTION AND RESPONSE SYSTEMS

Birukov M., Kim Z.

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

The paper addresses the problem of automated detection of network traffic anomalies by means of machine learning. The necessity of moving from signature-based methods to behavioral analysis capable of revealing previously unseen attacks is justified. A hybrid model architecture is described, combining a novelty detector based on the isolation forest and an attack classifier based on gradient boosting of decision trees. The class imbalance problem and the robustness of the proposed solution to adversarial input perturbations are analyzed. The results of an experimental evaluation on a benchmark network dataset are presented, along with a description of an interactive visualization subsystem of detected threats for information security analysts.

Key words: network traffic analysis, machine learning, anomaly detection. NDR systems, hybrid models, interactive visualization, Python, XGBoost, Isolation Forest, adversarial attacks

УДК 004.415.2:004.75
ГРНТИ 50.41.25

РАЗРАБОТКА РАСПРЕДЕЛЁННОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА И ЛОГИРОВАНИЯ С ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫМ АНАЛИЗОМ ДЛЯ JAVA/SPRING-ПРИЛОЖЕНИЙ

М. А. Бирюков, И. А. Фетюхин

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В статье рассматривается программный комплекс интеллектуального мониторинга и логирования для распределенных приложений на платформе Java с использованием фреймворка Spring Boot. Предложенная система объединяет в едином контуре сбор журналов и показателей производительности, колоночное хранилище, запросы к метрикам на подмножестве языка PromQL, формализованную подсистему правил оповещений и двухступенчатый интеллектуальный анализ событий. На первом этапе анализа выполняется статистический отбор аномальных временных рядов; на втором – пакетная классификация отобранных кандидатов большой языковой моделью с учетом текстового контекста оператора. Экспериментальная оценка на воспроизводимом стенде показала субсекундную задержку доставки телеметрии при устойчивой нагрузке до одной тысячи событий в секунду и снижение доли ложных срабатываний по сравнению с пороговым правилом при сохранении детектирования реального инцидента.

мониторинг, логирование, наблюдаемость, микросервисы, Spring Boot, ClickHouse, PromQL, большая языковая модель, алерты

Эксплуатация современных корпоративных информационных систем все чаще строится вокруг микросервисной архитектуры: прикладная функциональность распределена между десятками и сотнями независимо развертываемых сервисов [1, 2]. Для таких систем критически важна наблюдаемость – способность по внешним признакам судить о внутреннем состоянии приложения и причинах отклонений [3]. На практике наблюдаемость обеспечивается прежде всего журналами и метриками; при этом готовые открытые платформы – стек Elastic, связка Prometheus и Grafana – зачастую хранят эти виды телеметрии раздельно и требуют подключения нескольких независимых агентов в каждом приложении [4, 5]. Дополнительной проблемой остается «усталость от оповещений»: пороговые правила в условиях изменчивой нагрузки либо срабатывают на штатных всплесках, либо пропускают реальные деградации.

Для устранения указанных ограничений в выпускной квалификационной работе разработана система IML (Intelligent Monitoring and Logging) – распределенный программный комплекс централизованного сбора, хране-

ния, поиска и интеллектуального анализа телеметрии Java/Spring-приложений. Цель разработки – повышение эффективности мониторинга и оперативного анализа инцидентов за счет единой точки интеграции в приложении, единого хранилища и универсального контура интеллектуального анализа, не требующего обучения отдельной модели для каждого сервиса.

Архитектура системы IML построена по принципам микросервисной декомпозиции и повторяет проверенную практикой цепочку «агент → приемник → очередь → обработчик → хранилище → интерфейс оператора» [4]. Прикладное Java-приложение подключает встраиваемую библиотеку `iml-spring-boot-starter`, которая перехватывает события Logback и экспортирует метрики Micrometer, отправляя их по протоколу gRPC в сервис приема `iml-gateway`. Далее данные публикуются в Apache Kafka с подтверждением доставки, потребляются сервисом `iml-processor` и пакетно записываются в колоночную СУБД ClickHouse. Backend-сервис `iml-api` предоставляет REST API для поиска по логам, выполнения запросов на подмножестве PromQL, управления дашбордами, правилами алертов и подсистемой интеллектуального анализа; веб-интерфейс реализован на платформе Vue 3. Общая схема системы представлена на рис. 1.

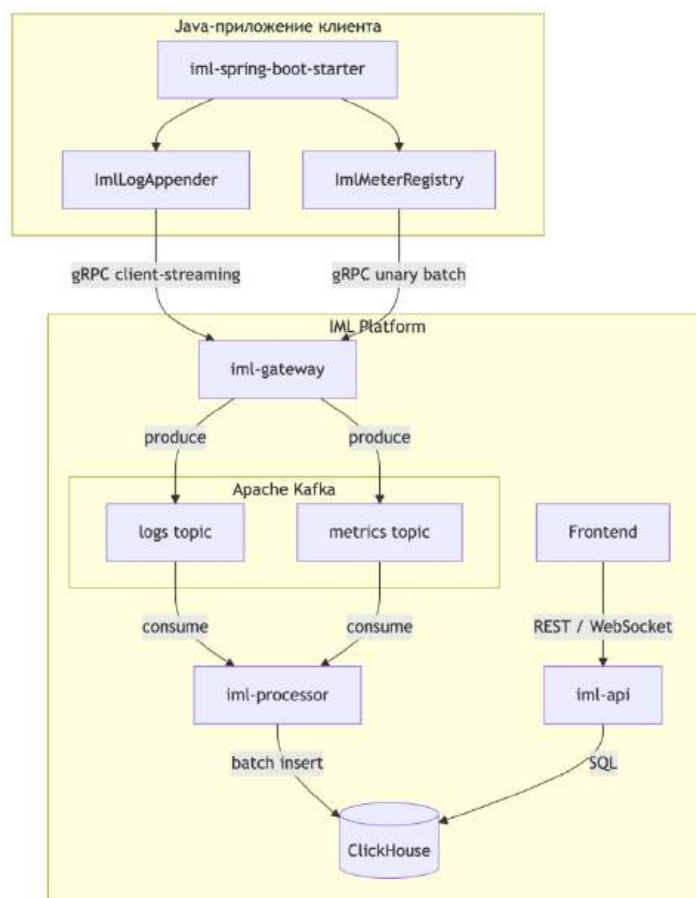


Рис. 1. Общая архитектура системы IML

Поток данных в системе однонаправленный: клиентская библиотека не зависит от деталей инфраструктуры платформы, а развязка через очередь сообщений обеспечивает буферизацию и устойчивость конвейера при кратковременных сбоях сервиса записи. Единое хранилище логов и метрик упрощает корреляцию событий при расследовании инцидентов по сравнению с типовой схемой, в которой журналы и временные ряды хранятся в разных подсистемах [4, 5].

Подсистема правил алертов реализована в виде конечного автомата с состояниями OK, PENDING, FIRING и RESOLVED. Переход в состояние FIRING возможен только после непрерывного выполнения условия правила в течение интервала `forDuration`, что подавляет кратковременные выбросы. Поддерживается «тихий» режим `muted`: правило продолжает оцениваться и вести журнал событий, но не инициирует внешние действия – это позволяет безопасно применять автоматически сгенерированные пороговые правила.

Ключевым отличием IML от классических платформ мониторинга является двухступенчатый контур интеллектуального анализа. На первом этапе компонент `MetricAnomalyScanner` выполняет SQL-агрегацию метрик по комбинации имени и набора тегов и для каждой серии вычисляет характерные значения по «свежему» окну `recent` и «опорному» окну `baseline`. Для счетчиков используется прирост в секунду с обработкой сбросов по канону Prometheus; для `gauge`-метрик – среднее значение по окну. Серия признается кандидатом, если относительное изменение превышает порог `relative-change-ratio` (по умолчанию 0,35), где ε – минимальное опорное значение, защищающее от деления на ноль. Дополнительно отсекаются «шумные» метрики и серии с недостаточным числом точек в окне; оставшиеся кандидаты сортируются по убыванию r и передаются на следующий этап.

На втором этапе все кандидаты одного сервиса объединяются в один JSON-запрос и направляются в большую языковую модель одним вызовом – это снижает стоимость эксплуатации по сравнению со схемой «один вызов на каждую серию». Системный промпт модели описывает семантику метрик Java/Spring/Micrometer; в него также включается свободно-текстовая подсказка оператора `metricsGuardPromptHint`, позволяющая пометить плановое обслуживание или раскатку релиза как ожидаемое поведение. Модель возвращает бинарное решение `should_alert`, пояснение `reason` и краткий текст голосового оповещения на русском языке (не более 220 символов). При положительном решении выполняется голосовой вызов оператора через сервис MTS Exolve.

Экспериментальная оценка проводилась на стенде Docker Compose с демонстрационным приложением iml-demo-aPP. Работоспособность программного комплекса подтверждена комплексом из 23 классов автоматизированных тестов на JUnit 5 и Testcontainers.

Задержка доставки телеметрии измерялась как разность между временем формирования события в приложении и временем записи в ClickHouse. На устойчивой нагрузке 100, 500 и 1000 событий в секунду лог-конвейер обеспечивал доставку без потерь; перцентиль p99 задержки не превышал 135 миллисекунд, для метрик-конвейера – 120 миллисекунд (табл. 1). Рост нагрузки на порядок практически не влиял на p99, что указывает на доминирование постоянных задержек буферизации и сетевой передачи, а не пропускной способности хранилища.

ТАБЛИЦА 1. Задержка доставки телеметрии при устойчивой нагрузке

Сценарий	Конвейер	p50, с	p99, с	Потери
100 событий/с	Логи	0,081	0,132	0
100 событий/с	Метрики	0,042	0,120	-
500 событий/с	Логи	0,085	0,131	0
500 событий/с	Метрики	0,040	0,108	-
1000 событий/с	Логи	0,085	0,135	0
1000 событий/с	Метрики	0,032	0,107	-

Корректность подсистемы алертов проверена на трех сценариях: кратковременный «шум», длительная аномалия и «тихий» режим. В сценарии «шум» переходов в состояние FIRING не зафиксировано; при длительной аномалии интервал между PENDING и FIRING составил 35,2 с при forDuration = 30 с; в «тихом» режиме при переходе в FIRING зафиксировано событие ACTION_MUTED без отправки уведомления.

Сопоставление интеллектуального анализа с базовым пороговым правилом выполнено на четырех сценариях с идентичной физической нагрузкой и переменной подсказкой оператора (табл. 2). Во всех случаях воспроизводился спайк ошибок 5xx на демонстрационном сервисе; менялся только текст metricsGuardPromptHint.

ТАБЛИЦА 2. Вердикты интеллектуального анализа и порогового правила

Сценарий	Подсказка оператора	Ожидание	AI-анализ	Пороговое правило
A1. Реальный инцидент	пустая	ALERT	ALERT (верно)	ALERT (верно)
A2. Регламентное обслуживание	«не алертить»	ОК	ОК (верно)	ALERT (ложно)
A3. Раскатка релиза	«допустим рост 5xx»	ОК	ОК (верно)	ALERT (ложно)
A4. Норма	пустая	ОК	ОК (верно)	ОК (верно)

Как следует из табл. 2, интеллектуальный анализ корректно классифицировал реальный инцидент (A1) и подавил два ложных срабатывания (A2, A3), которые пороговое правило не способно различить из-за отсутствия интерфейса учета эксплуатационного контекста. По результатам четырех сценариев точность положительных срабатываний (precision) выросла с 0,33 до 1,00 при полноте (recall) 1,00.

Таким образом, разработанная система IML объединяет в едином открытом программном комплексе сбор телеметрии, единое колоночное хранилище, подмножество PromQL, формализованную подсистему алертов и универсальный контур интеллектуального анализа с учетом текстового контекста оператора. Измеренные характеристики конвейера и результаты сопоставления алгоритмов выявления аномалий подтверждают практическую применимость предложенного решения для мониторинга Java/Spring-приложений в учебных и небольших корпоративных контурах.

Список используемых источников

1. Newman S. Building Microservices: Designing Fine-Grained Systems / S. Newman. 2-е изд. Sebastopol: O'Reilly Media, 2021. 612 p.
2. Richardson C. Microservices Patterns: With examples in Java / C. Richardson. Shelter Island: Manning Publications, 2018. 520 p.
3. Sridharan C. Distributed Systems Observability: A Guide to Building Robust Systems / C. Sridharan. Sebastopol: O'Reilly Media, 2018. 36 p.
4. Elastic – Elastic Stack and Product Documentation. URL: <https://www.elastic.co/guide/> (дата обращения: 17.05.2026).
5. Prometheus – Prometheus Documentation. URL: <https://prometheus.io/docs/> (дата обращения: 17.05.2026).

DISTRIBUTED MONITORING AND LOGGING SYSTEM WITH INTELLIGENT ANALYSIS FOR JAVA/SPRING APPLICATIONS

Birukov M., Fetyukhin I.

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

The paper describes the IML (Intelligent Monitoring and Logging) software platform for distributed Java applications built with the Spring Boot framework. The proposed system integrates log and metric collection, a columnar storage backend, a PromQL query subset, a formal alerting rule engine, and a two-stage intelligent analysis pipeline. At the first stage, a statistical prefilter selects anomalous time series; at the second stage, a large language model performs batch classification of the selected candidates with operator-provided textual context. Experimental evaluation on a reproducible Docker Compose testbed demonstrated sub-second telemetry delivery latency at a sustained load of up to one thousand events per second and a reduction of false positive alerts compared with a threshold rule while preserving detection of a real incident.

Key words: monitoring, logging, observability, microservices, Spring Boot, ClickHouse, PromQL, large language model, alerting

УДК 004.85
ГРНТИ 28.23.02**ВЛИЯНИЕ НА СХОДИМОСТЬ СТРАТЕГИЙ ИЗМЕНЕНИЯ
СКОРОСТИ ОБУЧЕНИЯ ТРАНСФОРМЕРОВ****И. Б. Бондаренко, П. В. Матвеев**

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В работе исследуется влияние стратегий изменения скорости обучения на сходимость и качество трансформерных моделей. Рассматриваются постоянная, линейная и косинусная стратегии при дообучении моделей BERT и Vision Transformer (ViT) с оптимизатором AdamW. Показано, что для BERT выбор стратегии слабо влияет на итоговую точность (в пределах 92.4–92.7 %), но отражается на динамике обучения, где косинусная стратегия демонстрирует наилучшее значение интегральной метрики AULC. Для ViT влияние оказывается существенно более выраженным: постоянная скорость обучения приводит к нестабильности и деградации качества, линейная обеспечивает устойчивую сходимость, а косинусная достигает наилучших результатов (до 93.0 % точности). Результаты показывают, что чувствительность к выбору стратегии зависит от архитектуры модели.

BERT, Vision Transformer, AdamW, скорость сходимости, cosine annealing, linear decay**Введение**

Трансформерные архитектуры в последние годы стали основой современных систем обработки естественного языка и компьютерного зрения [1]. Основной причиной их широкого распространения является механизм self-attention, позволяющий эффективно учитывать зависимости между элементами последовательности независимо от расстояния между ними. По сравнению с рекуррентными и сверточными архитектурами трансформеры обеспечивают более высокую эффективность обучения и лучшую масштабируемость.

На основе архитектуры Transformer были разработаны модели BERT [2] и Vision Transformer [3]. Модель BERT широко применяется в задачах обработки текста, включая классификацию, анализ тональности и извлечение информации. Vision Transformer использует аналогичный принцип attention-механизма для обработки изображений и демонстрирует высокое качество в задачах классификации изображений.

Одним из ключевых факторов, влияющих на качество обучения нейросетевых моделей, является выбор оптимизатора и стратегии изменения скорости обучения. В современных трансформерных архитектурах ши-

роко применяется оптимизатор AdamW [4], обеспечивающий разделение weight decay и шага оптимизации. Помимо выбора оптимизатора существенное влияние на устойчивость обучения оказывает scheduler скорости обучения.

На практике наиболее распространенными стратегиями являются постоянная скорость обучения, линейное уменьшение и косинусное уменьшение learning rate. Неправильный выбор scheduler может приводить к неустойчивости оптимизации, переобучению или деградации качества модели.

Постановка эксперимента

Целью работы является исследование влияния различных стратегий изменения скорости обучения на качество и устойчивость fine-tuning моделей BERT и Vision Transformer. В рамках исследования рассматривались три стратегии изменения learning rate: постоянная скорость обучения, линейное уменьшение и косинусное уменьшение.

Для оптимизации использовался алгоритм AdamW. Эксперименты проводились в режиме полного fine-tuning моделей.

В процессе экспериментов анализировались итоговая точность модели, устойчивость процесса обучения и интегральная метрика площади под кривой обучения (AULC), характеризующая динамику обучения модели. Для оценки качества использовались результаты валидационной выборки.

Метрика площади под кривой обучения – это интегральный показатель, который, в отличие от финальной точности или времени до достижения цели, учитывает всю траекторию обучения – насколько быстро и стабильно модель повышает качество в процессе оптимизации.

Результаты экспериментов для модели BERT представлены в таблице 1.

ТАБЛИЦА 1. Результаты обучения модели BERT при различных scheduler

Стратегия	Итоговая точность, %	AULC	Время обучения, с
None	92.43	366.00	765.29
Linear Decay	92.43	368.58	768.27
Cosine Annealing	92.66	370.01	768.10

Как видно из таблицы 1, для модели BERT влияние scheduler на итоговую точность оказывается сравнительно небольшим. Во всех configura-

циях итоговая точность превышает 92 %. Наилучшие значения AULC демонстрирует косинусная стратегия изменения скорости обучения.

Использование постоянной скорости обучения приводит к менее устойчивой динамике обучения на поздних эпохах. Линейная стратегия обеспечивает более плавное снижение ошибки, однако лучшие результаты достигаются при использовании cosine scheduler.

Результаты для Vision Transformer

Результаты экспериментов для модели Vision Transformer представлены в таблице 2.

ТАБЛИЦА 2. Результаты обучения модели Vision Transformer при различных scheduler

Стратегия	Итоговая точность, %	AULC	Время обучения, с
None	33.29	10.45	176.47
Linear Decay	86.70	11.63	176.45
Cosine Annealing	93.02	12.54	176.59

Для модели Vision Transformer влияние scheduler оказывается значительно более выраженным. Использование постоянной скорости обучения приводило к нестабильности процесса оптимизации и деградации качества на поздних эпохах обучения.

Линейная стратегия обеспечивала более устойчивую сходимость модели, однако наилучшие результаты достигались при использовании косинусного scheduler. Максимальная точность модели составила 93 %. Полученные результаты показывают, что для Vision Transformer корректный выбор learning rate scheduler играет существенно более важную роль, чем для BERT.

Заключение

В работе исследовано влияние различных стратегий изменения скорости обучения на качество и устойчивость обучения трансформерных моделей BERT и Vision Transformer. Установлено, что для BERT различия между scheduler оказываются сравнительно небольшими, тогда как для Vision Transformer выбор стратегии изменения learning rate существенно влияет на устойчивость оптимизации и итоговое качество модели. Наилучшие ре-

зультаты для обеих архитектур продемонстрировала косинусная стратегия изменения скорости обучения.

Полученные результаты подтверждают необходимость индивидуального подбора scheduler в зависимости от архитектуры модели и особенностей задачи.

Список используемых источников

1. Vaswani A., Shazeer N., Parmar N., Uszkoreit J., Jones L., Gomez A. N., Kaiser Ł., Polosukhin I. Attention Is All You Need // Advances in Neural Information Processing Systems. 2017. URL: <https://arxiv.org/abs/1706.03762> (дата обращения: 05.03.2026).
2. Devlin J., Chang M.-W., Lee K., Toutanova K. BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding // Proceedings of NAACL. 2019. URL: <https://arxiv.org/abs/1810.04805> (дата обращения: 05.03.2026).
3. Dosovitskiy A., Beyer L., Kolesnikov A., Weissenborn D., Zhai X. и др. An Image Is Worth 16×16 Words: Transformers for Image Recognition at Scale // arXiv preprint. 2020. URL: <https://arxiv.org/abs/2010.11929> (дата обращения: 05.03.2026).
4. Лошчилов И., Хаттер Ф. Разделение весового штрафа и градиентного шага в AdamW // International Conference on Learning Representations. 2019. URL: <https://arxiv.org/abs/1711.05101> (дата обращения: 05.03.2026).

INFLUENCE ON THE CONVERGENCE OF STRATEGIES FOR CHANGING THE LEARNING RATE OF TRANSFORMERS

Bondarenko I., Matveev P.

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

This paper examines the impact of learning rate scheduling strategies on the convergence and quality of transformer models. Constant, linear, and cosine strategies are considered when fine-tuning BERT and Vision Transformer (ViT) models with the AdamW optimizer. It is shown that for BERT, the choice of strategy has little effect on final accuracy (within 92.4–92.7 %), but it does affect training dynamics, where the cosine strategy achieves the best value of the integral metric AULC. For ViT, the influence is significantly more pronounced: a constant learning rate leads to instability and quality degradation, a linear schedule ensures stable convergence, and a cosine schedule yields the best results (up to 93.0 % accuracy). The results demonstrate that sensitivity to the choice of strategy depends on the model architecture.

Key words: BERT, Vision Transformer, AdamW, convergence rate, cosine annealing, linear decay

УДК 004.852

ГРНТИ 28.23.20

ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК СЕТЕВОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ПРОМЫШЛЕННОГО ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ ДЛЯ ЗАДАЧ ПРЕДИКТИВНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ

И. Б. Бондаренко, Д. М. Соловьев

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В работе рассматривается применение цифрового двойника сетевой инфраструктуры промышленного интернета вещей для решения задач предиктивного обслуживания. Рассмотрены метрики, определяющие надежность сети. Рассмотрена целесообразность использования цифрового двойника как средства непрерывного мониторинга, анализа телеметрии и прогнозирования отказов элементов сети. Предложено рассматривать цифровой двойник для сети промышленного интернета вещей в виде многоуровневой архитектуры.

цифровой двойник, промышленный интернет вещей, предиктивное обслуживание, сетевая инфраструктура, надежность сети, прогнозирование отказов, телеметрия

Надежность сетевой инфраструктуры в системах промышленного интернета вещей является одним из ключевых факторов устойчивого функционирования производственной среды. В отличие от традиционных корпоративных сетей, промышленные сети обеспечивают передачу между датчиками, актуаторами, граничными агрегаторами данных и вычислительными узлами верхнего уровня, от которых зависит качество и безопасность технологического процесса.

Традиционные подходы к обеспечению надежности объекта, основанные на регламентном обслуживании и внеплановом ремонте, имеют ряд ограничений, в сравнении с предиктивным обслуживанием [1].

Цифровые двойники являются перспективным направлением повышения эффективности эксплуатации различных объектов, а также являются одним из ключевых компонентов индустрии 4.0 [2]. Одно из свойств цифрового двойника – отражение состояния объекта в реальном времени, позволяет с помощью различных алгоритмов прогнозировать его состояние в будущем, что позволяет перейти к предиктивному обслуживанию [2, 3].

Существуют три уровня цифровизации объекта: цифровая модель, цифровая тень, цифровой двойник. Цифровая модель – это цифровая копия существующего физического объекта, такая модель не меняет свое состояние с изменением состояния физического объекта. Цифровая тень – цифровая копия объекта, которая изменяет свое состояние в соответствии с состоянием физического объекта в реальном времени. Такой подход можно рассматривать как инструмент для мониторинга сетевой инфраструктуры. Цифровой двойник имеет двунаправленную связь с физическим объектом, в случае такой связи физический объект изменяет состояние цифрового двойника, а также изменения цифрового двойника отражаются на физическом объекте [2]. Построение цифрового двойника сетевой инфраструктуры промышленного интернета вещей позволит создать модель прогнозирования отказов отдельных узлов или связей между ними, что должно повысить коэффициент готовности системы [4].

Надежность сетевой инфраструктуры промышленного интернета вещей целесообразно рассматривать как совокупность измеримых характеристик, отражающих текущее и прогнозируемое состояние сети. Для этого в практике применяются сетевые метрики, позволяющие оценивать качество передачи данных. К числу наиболее значимых метрик относятся: задержка передачи, джиттер, коэффициент потерь пакетов, пропускная способность, доступность узлов и каналов, а также частота отказов и время восстановления после отказа [5].

Для создания точного цифрового двойника данные метрики не могут рассматриваться изолированно, поскольку для задач предиктивного обслуживания важны не только их текущие значения, но и взаимосвязь с топологией сети, состоянием отдельных узлов, историческими данными. В таком случае целесообразно рассматривать цифровой двойник как многоуровневую архитектуру, обеспечивающую последовательное преобразование первичных телеметрических данных в диагностические и прогностические выводы, а также в рекомендации по техническому обслуживанию и ремонту. На рис. 1 изображена архитектура описанного цифрового двойника.

Из рис. 1 следует, что на разных уровнях выполняются задачи различной вычислительной сложности. Сети промышленного интернета вещей имеют сложную, в сравнении с традиционными корпоративными сетями, архитектуру. Это обусловлено значительным объемом трафика, генерируемого сенсорами [6]. В случае интеграции в такую сеть цифрового двойника целесообразно использовать многоуровневую схему обработки данных, в которой

функции сбора, предварительного анализа и прогнозирования распределяются между граничными, туманными и облачными уровнями [6, 7].

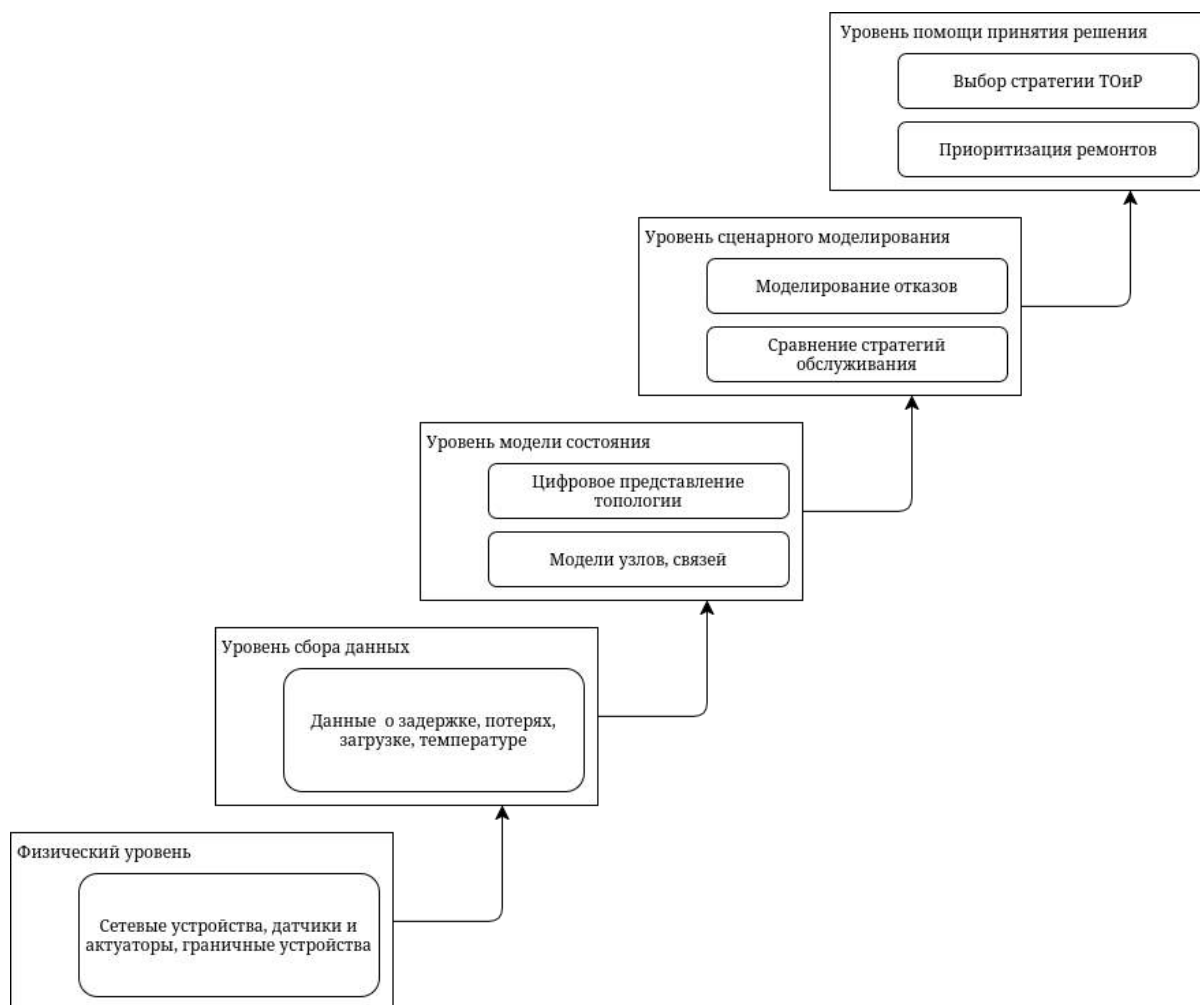


Рис. 1. Многослойная архитектура цифрового двойника сети промышленного интернета вещей

Таким образом, цифровой двойник сетевой инфраструктуры промышленного интернета вещей может рассматриваться как эффективный инструмент предиктивного обслуживания, обеспечивающий переход от реактивных и предупредительных подходов к прогнозированию технического состояния сети. Использование совокупности параметров цифрового двойника позволяет не только оценивать текущее состояние инфраструктуры, но и выявлять признаки потенциальных отказов. Многоуровневая архитектура обеспечивает рациональное распределение вычислительных задач и повышает скорость обработки данных. Применение цифрового двойника создает предпосылки для повышения коэффициента готовности сетевой инфраструктуры промышленного интернета вещей.

Список используемых источников

1. Rafael Goriveau, Kamal Medjaher. Nouredine Zerhouni from Prognostics and Health Systems Management to Predictive Maintenance 1. ISTE Ltd, 2016. 180 с.
2. Fuller A., Fan Z., Day C., Barlow C. Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research" // IEEE Access, 2020. Vol. 8. PP. 108952-108971, 2020, DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2998358.
3. ГОСТ Р 57329-2016/EN 13306:2010 «Системы технического обслуживания и ремонта. Термины и определения» // URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200142894> (дата обращения: 24.04.2026).
4. ГОСТ Р 27.102-2021 «Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения» // URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200181141> (дата обращения: 24.04.2026).
5. ITU-T Recommendation «Y.1540: Internet protocol data communication service – IP packet transfer and availability performance parameters» // URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.1540-201912-I/en> (дата обращения: 26.04.2026)
6. Alabadi M., Habbal A. and Wei X. Industrial Internet of Things: Requirements, Architecture, Challenges, and Future Research Directions" // IEEE Access, 2022. Vol. 10. PP. 66374-66400, DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3185049.
7. Abdullahi I., Longo S., Samie M. Towards a Distributed Digital Twin Framework for Predictive Maintenance in Industrial Internet of Things (IIoT) // Sensors. 2024. Vol. 24. N 8. Art. 2663. DOI: 10.3390/s24082663.

DIGITAL TWIN OF IIOT NETWORK INFRASTRUCTURE FOR PREDICTIVE MAINTENANCE

Bondarenko I., Soloviev D.

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

This paper examines the application of a digital twin of the Industrial Internet of Things (IIoT) network infrastructure for solving predictive maintenance tasks. The metrics that determine network reliability are considered. The feasibility of using a digital twin as a tool for continuous monitoring, telemetry analysis, and prediction of failures of network elements is discussed. It is proposed to consider the digital twin of an Industrial Internet of Things network in the form of a multi-level architecture.

Key words: digital twin, industrial internet of things (IIoT), predictive maintenance. Network infrastructure. Network reliability, failure prediction, telemetry

УДК 004.94

ГРНТИ 28.17.19

СРАВНЕНИЕ КЛАССИЧЕСКИХ И ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННЫХ МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ СВЕТОФОРАМИ ПРИ ВАРЬИРОВАНИИ ПЛОТНОСТИ СПРОСА

И. Б. Бондаренко, А. А. Суслов

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В работе рассматривается задача сравнительной оценки методов управления светофорными объектами в улично-дорожной сети при варьировании плотности транспортного спроса. Анализ имеющихся сравнительных исследований выявил, что они часто дают разным методам разный объем входных данных, что искажает оценку их относительной эффективности. Предложен унифицированный протокол сравнения: все методы получают одинаковую информацию о состоянии перекрестков и работают по одинаковым правилам выбора фазы. По этому протоколу реализованы и сопоставлены пять методов: фиксированный цикл, расчет Webster, актуизируемое управление, SOTL и MaxPressure. Эксперименты проведены в микроскопическом транспортном симуляторе на сети из 16 перекрестков (решетка 4×4) при равномерном и постоянном во времени спросе с пятью уровнями загрузки от 0,2 до 0,95. Показано, что децентрализованный метод MaxPressure дает заметно меньшую среднюю задержку, чем остальные методы, во всем исследованном диапазоне загрузки. Этот результат объяснен теоретическим свойством метода – способностью стабилизации очередей.

управление светофорами, плотность транспортного спроса, децентрализованное управление, MaxPressure, расчет Webster, средняя задержка, стабилизация очередей, имитационное моделирование

Светофорное регулирование остается основным инструментом управления транспортными потоками на оперативном уровне в улично-дорожных сетях городов. Рост загрузки сетей и развитие интеллектуальных транспортных систем стимулируют разработку как уточненных классических методов расчета циклов, так и децентрализованных методов, принимающих решения по локальному состоянию перекрестка. Выбор метода для внедрения требует объективного сравнения подходов в сопоставимых условиях.

Существующие сравнительные исследования носят преимущественно точечный характер: методы сопоставляются на разных симуляционных средах, топологиях и сценариях спроса, с использованием различных метрик качества [1, 2]. Принципиальной методологической проблемой является

асимметрия входных данных – разным методам предоставляется разный объем информации о состоянии сети, вследствие чего наблюдаемые различия отражают не алгоритмические свойства методов, а полноту их наблюдений. Это не позволяет делать обоснованные выводы об относительной эффективности подходов.

Цель работы – сравнить классические и децентрализованные методы управления светофорами в едином протоколе с равными условиями для всех подходов и установить зависимость их относительной эффективности от плотности транспортного спроса.

В основу сравнения положено требование информационной симметрии. Каждый перекресток моделируется как агент, получающий на каждом такте управления одинаковый по структуре вектор наблюдения: длины очередей на входящих полосах, текущую фазу в кодировке one-hot, время с момента последнего переключения и длины очередей на ближайших исходящих полосах. Ни один метод не использует информации, недоступной другим; различие между методами состоит только в способе обработки одних и тех же данных.

Пространство действий также унифицировано: на каждом такте длительностью $\Delta t = 5$ с агент выбирает следующую фазу из множества допустимых; выбор текущей фазы означает ее продление, выбор другой – переключение через промежуточный такт (желтый и все-красный сигналы, $\tau_{\text{yellow}} = 3$ с). Оценка всех методов производится по одинаковым метрикам, рассчитанным из реализаций имитационного процесса.

В протоколе реализованы пять методов. Фиксированный цикл с расчетом по формуле Webster определяет длительности фаз заранее по заданным интенсивностям спроса и не изменяет их в течение эпизода [3]. Активируемое управление продлевает фазу при наличии потока на разрешенном направлении в пределах между минимальной и максимальной длительностью (логика gap-out) [4]. SOTL (Self-Organizing Traffic Lights) переключает фазу при накоплении на конкурирующем направлении порогового числа транспортных средств, реализуя локальную самоорганизацию [5]. MaxPressure на каждом такте вычисляет давление каждой допустимой фазы как сумму разностей длин очередей на входящих и исходящих полосах и активирует фазу с максимальным давлением [6]. Базовой границей служит фиксированный цикл без оптимизации Webster. Параметры одинаковы для всех методов, где это применимо: $\tau_{\text{min}} = 5$ с, $\tau_{\text{max}} = 60$ с (для активируе-

мого управления $\tau_{\max} = 50$ с, $\tau_{\text{gap}} = 3$ с; для SOTL порог $\theta = 7$ ТС, шаг $\omega = 1$ ТС).

Эксперименты проведены в микроскопическом транспортном симуляторе SUMO версии 1.20.0 [7] с использованием программной обвязки sumo-rl [8] и эталонного набора RESCO [9]. Движение транспортных средств моделируется по модели следования за лидером Краусса. Исследуемая сеть – регулярная решетка 4×4 из 16 регулируемых перекрестков, сгенерированная средствами netgenerate; все перекрестки гомогенны по геометрии и числу фаз. Длительность эпизода – 1000 с.

Спрос задавался равномерным по направлениям (симметрия $\sigma = 1$) и постоянным во времени (стационарный режим). Варьируемым параметром являлась плотность спроса ρ – отношение совокупного входящего потока к пропускной способности сети – со значениями $\rho \in \{0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 0,95\}$. Каждая экспериментальная точка прогонялась на пяти случайных начальных значениях генератора (seed). Основной метрикой служит средняя задержка – усредненное по всем транспортным средствам превышение фактического времени проезда над временем проезда в свободных условиях. Результаты приведены в таблице 1 и на рис. 1.

ТАБЛИЦА 1. Средняя задержка (с) методов управления на сети 4×4 при стационарном симметричном спросе

Метод	$\rho = 0,2$	$\rho = 0,4$	$\rho = 0,6$	$\rho = 0,8$	$\rho = 0,95$
Фиксированный цикл	118,4	119,7	125,8	126,0	130,2
Webster	101,1	98,8	106,4	117,0	130,4
Активируемое	101,5	107,3	114,6	120,5	126,8
SOTL	91,2	105,6	115,3	123,0	130,9
MaxPressure	68,1	66,5	66,1	67,3	69,8

Метод MaxPressure обеспечивает наименьшую среднюю задержку во всем диапазоне плотности; его кривая практически не зависит от загрузки и остается в пределах 66–70 с. Остальные четыре метода демонстрируют монотонный рост задержки с увеличением плотности. Разрыв между MaxPressure и лучшим из классических методов (расчет Webster) монотонно возрастает с 32,6 % при $\rho = 0,2$ до 46,5 % при $\rho = 0,95$. При высокой

загрузке ($\rho \geq 0,8$) задержки фиксированного цикла, актуизируемого управления, SOTL и расчета Webster сближаются на уровне 117–131 с, тогда как MaxPressure сохраняет уровень около 70 с.

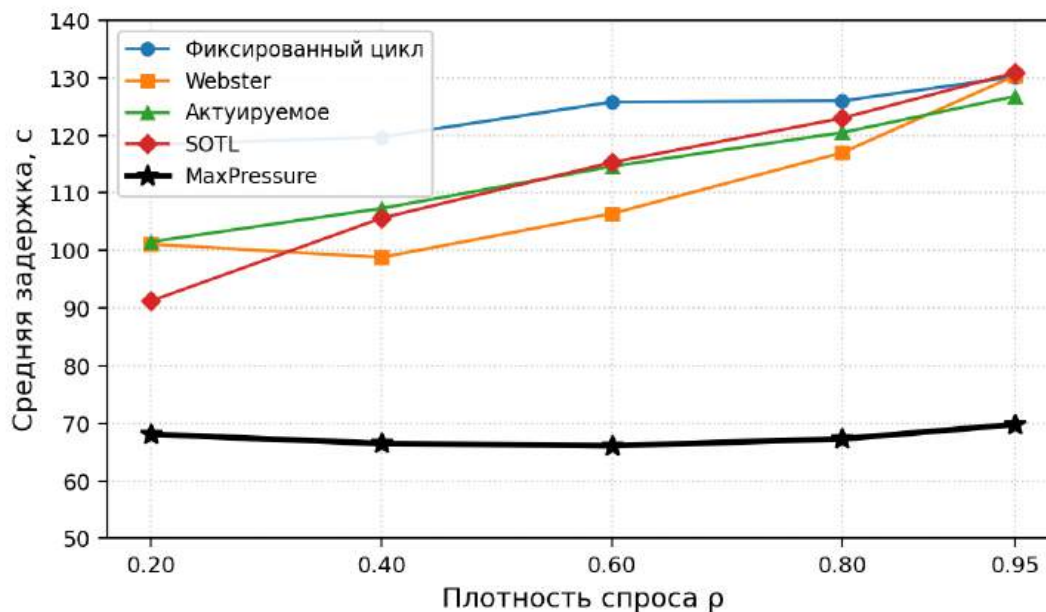


Рис. 1. Зависимость средней задержки от плотности транспортного спроса

Дополнительным свидетельством служит динамика средней длины очереди по сети. У всех методов, кроме MaxPressure, длина очереди растет практически линейно – от 5–7 до 35–38 транспортных средств при увеличении ρ от 0,2 до 0,95. У MaxPressure она возрастает лишь от 2,8 до 14,3 транспортного средства, то есть наклон кривой примерно в 2,5 раза меньше. Это указывает на то, что метод управляет непосредственно длиной очереди, а не опосредованно через расчет цикла.

Устойчивость MaxPressure к росту плотности объясняется его теоретическим свойством стабилизации очередей [6]: при выполнении условия реализуемости спроса метод удерживает средние длины всех очередей в сети ограниченными. Расчет по Webster оптимизирует распределение зеленого времени между фазами по критическим интенсивностям, но не управляет очередью на каждой полосе индивидуально в режиме реального времени; при росте плотности локальные флуктуации спроса приводят к накоплению очередей, на которое метод не реагирует. MaxPressure, напротив, на каждом такте оценивает разности очередей по всем парам входящая–исходящая полоса и адаптирует выбор фазы к текущему распределению очередей.

Учет состояния исходящих полос придает MaxPressure механизм встроенной локальной координации: при наличии очереди на исходящей

полосе давление соответствующей фазы снижается, что предотвращает дальнейшее накопление транспорта в перегруженных направлениях сети. У классических методов аналогичного механизма нет. Этот эффект тем сильнее, чем выше связность сети и плотность спроса, что согласуется с наблюдаемым ростом разрыва между MaxPressure и расчетом Webster по мере увеличения ρ .

В едином протоколе с равными условиями по входным данным и правилам выбора фазы сопоставлены пять методов управления светофорами на сети из 16 перекрестков при варьировании плотности спроса. Установлено, что децентрализованный метод MaxPressure обеспечивает заметно меньшую среднюю задержку, чем фиксированный цикл, расчет Webster, актулируемое управление и SOTL, во всем исследованном диапазоне загрузки, причем его преимущество возрастает с ростом плотности. Результат объясняется свойством стабилизации очередей и встроенным учетом состояния исходящих полос. Полученные выводы ограничены условиями стационарного симметричного спроса и сетью фиксированного размера; распространение протокола на нестационарный и асимметричный спрос, а также на сети других размеров составляет направление дальнейших исследований.

Список используемых источников

1. Wei H., Zheng G., Gayah V., Li Z. A Survey on Traffic Signal Control Methods // arXiv. 2019. arXiv:1904.08117. URL: <https://arxiv.org/abs/1904.08117> (дата обращения: 15.05.2025).
2. Noaen M. Naik A., Goodman L. [et al.] Reinforcement Learning in Urban Network Traffic Signal Control: A Systematic Literature Review // Expert Systems with Applications. 2022. Vol. 199. Article 116830.
3. Webster F. V. Traffic Signal Settings // Road Research Technical Paper. London: Her Majesty's Stationery Office, 1958. № 39. 45 p.
4. Roess R. P., Prassas E. S., McShane W. R. Traffic Engineering. 4th ed. Upper Saddle River: Pearson, 2011. 744 p.
5. Cools S.-B., Gershenson C., D'Hooghe B. Self-Organizing Traffic Lights: A Realistic Simulation // Advances in Applied Self-Organizing Systems. London: Springer, 2008. P. 41–50.
6. Varaiya P. Max Pressure Control of a Network of Signalized Intersections // Transportation Research Part C: Emerging Technologies. 2013. Vol. 36. P. 177–195.
7. Lopez P. A., Behrisch M., Bieker-Walz L. [et al.] Microscopic Traffic Simulation Using SUMO // Proceedings of the 21st International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). Maui, 2018. P. 2575–2582.
8. Alegre L. N. SUMO-RL: Reinforcement Learning Environment for Traffic Signal Control with SUMO. 2019. URL: <https://github.com/LucasAlegre/sumo-rl> (дата обращения: 15.05.2025).

9. Ault J., Sharon G. Reinforcement Learning Benchmarks for Traffic Signal Control // Proceedings of the Neural Information Processing Systems Track on Datasets and Benchmarks. 2021. Vol. 1.

COMPARISON OF CLASSICAL AND DECENTRALIZED TRAFFIC SIGNAL CONTROL METHODS UNDER VARYING DEMAND DENSITY.

Bondarenko I., Suslov A.

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

The paper addresses the comparative evaluation of traffic signal control methods in an urban road network under varying traffic demand density. A review of existing comparative studies reveals that they often provide different methods with different amounts of input data, which distorts the assessment of their relative efficiency. A unified comparison protocol is proposed: all methods receive identical information about the state of the intersections and operate under identical phase-selection rules. Within this protocol, five methods are implemented and compared: fixed-time control, Webster timing, actuated control, SOTL and MaxPressure. The experiments are carried out in a microscopic traffic simulator on a network of 16 intersections (a 4×4 grid) under uniform and time-constant demand at five load levels from 0.2 to 0.95. It is shown that the decentralized MaxPressure method yields a markedly lower average delay than the other methods across the entire studied load range. This result is explained by a theoretical property of the method – its ability to stabilize queues.

Key words: traffic signal control, traffic demand density, decentralized control, MaxPressure, Webster timing, average delay, queue stabilization, simulation

УДК 004.89

ГРНТИ 28.23.15

КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ КИБЕРФИЗИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ОБНАРУЖЕНИЯ ДОРОЖНО-ТРАНСПОРТНЫХ ПРОИСШЕСТВИЙ НА ОСНОВЕ ГОРОДСКОГО ВИДЕОНАБЛЮДЕНИЯ

П. А. Волынкин, Д. Г. Попугаев, К. М. Стрелец

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В статье представлена концептуальная модель киберфизической системы обнаружения дорожно-транспортных происшествий на основе городского видеонаблюдения. Исследуется возможность применения методов компьютерного зрения для выявления признаков аварийной ситуации. Рассматривается структура предлагаемой системы, включающей модуль видеоаналитики, блок анализа дорожной ситуации и механизм формирования сигнала экстренного реагирования. Предлагаемый подход ориентирован на использование существующей городской инфраструктуры и может рассматриваться как основа для дальнейшего развития интеллектуальных транспортных систем.

дорожно-транспортное происшествие, киберфизическая система, городское видеонаблюдение, компьютерное зрение, интеллектуальные транспортные системы

В современных условиях развитие городской инфраструктуры все чаще связано с внедрением цифровых технологий. Подобные решения уже применяются в крупнейших городах России. Так, в Москве функционирует городская система видеонаблюдения, предназначенная для сбора, обработки и хранения видеозаписей с камер по всему городу [1]. Кроме того, в транспортной инфраструктуре применяются средства адаптивного и координированного управления светофорными объектами: по данным Департамента транспорта Москвы, 70 % светофоров города уже работают в таком режиме [2]. Одним из приоритетных направлений такого развития является повышение безопасности дорожного движения, поскольку дорожно-транспортные происшествия по-прежнему приводят к значимым социальным последствиям. В связи с этим представляет интерес разработка концептуальной модели киберфизической системы, ориентированной на обнаружение дорожно-транспортных происшествий на основе данных с уже установленных и эксплуатируемых камер городского дорожного видеонаблюдения.

Актуальность данной темы определяется сохраняющейся значимостью проблемы высокой аварийности при дорожном движении в условиях городской среды. По данным ФКУ «НЦ БДД МВД России», за 6 месяцев 2025 года на территории Российской Федерации было зарегистрировано 55 964 дорожно-транспортных происшествия, в которых погибли 5 802 человека и были ранены – 69 733; при этом 78,6 % ДТП произошли на территории городов и населенных пунктов [3]. Такая высокая концентрация происшествий в городской среде показывает необходимость развития средств автоматизированного мониторинга дорожной обстановки. Поскольку в части городов Российской Федерации уже функционирует инфраструктура видеонаблюдения, ее использование для выявления признаков ДТП может рассматриваться как один из способов повышения оперативности обнаружения аварийных ситуаций. При этом важным является не только факт фиксации происшествия, но и возможность последующего формирования сигнала экстренного реагирования.

В настоящее время технологии компьютерного зрения уже применяются в дорожной инфраструктуре, в том числе и для автоматической фиксации нарушения правил дорожного движения. Однако обнаружение ДТП остается сложной задачей, поскольку аварийная ситуация обычно определяется не одним отдельным кадром, а изменением дорожной сцены с течением времени. Поэтому при анализе видеопотока необходимо учитывать не только наличие транспортных средств и пешеходов, но и динамику их движения. В отечественных исследованиях такой подход рассматривается как последовательность этапов: получение видеопотока с камеры наблюдения, распознавание объектов, отслеживание их перемещения, вычисление траекторий и определение типа дорожного события [4]. В рамках предлагаемой модели модуль анализа изображения выполняет первичное выделение объектов и параметров их движения, а оценку признаков возможного ДТП формирует модуль принятия решений на основе полученных данных.



Рис. 1. Концептуальная модель киберфизической системы обнаружения ДТП на основе городского видеонаблюдения.

Представленная на рис. 1 модель отражает последовательную обработку данных от момента получения видеопотока до формирования сигнала экстренного реагирования. Источником данных выступает камера видеонаблюдения, установленная на участке городской дорожной инфраструктуры. Видеопоток с камеры поступает в модуль предобработки, где может выполняться подготовка изображения к дальнейшему анализу: выделение кадров, устранение помех, нормализация изображения и приведение данных к формату, пригодному для обработки средствами компьютерного зрения.

Следующим элементом модели является модуль анализа изображения. Его задача заключается в распознавании объектов дорожной сцены, в том числе транспортных средств и пешеходов, а также в определении параметров их движения. Полученные данные передаются в модуль принятия решений, где выполняется оценка признаков возможного ДТП. К таким признакам могут относиться резкое сближение объектов, пересечение траекторий, внезапная остановка или нетипичное изменение направления движения. При этом решение о наличии аварийной ситуации должно формироваться не по одному кадру, а на основе анализа последовательности изменений в дорожной сцене (рис. 2).



Рис. 2. Демонстрационный пример выделения объектов и фиксации признаков аварийной ситуации на видеопотоке городской камеры.

Завершающим компонентом предлагаемой модели является модуль уведомления и передачи сигнала в систему экстренного реагирования. Его назначение состоит в формировании сообщения о предполагаемом происшествии, содержащего сведения о месте фиксации события, времени его обнаружения и характере выявленной аварийной ситуации. В Российской Федерации функционирование системы обеспечения вызова экстренных оперативных служб по единому номеру «112» регламентируется постановлением Правительства РФ от 21.11.2011 № 958 [5]. Поэтому в рамках концептуальной модели передача сигнала должна рассматриваться не как произвольное уведомление, а как формирование структурированных

данных, которые в дальнейшем могут быть использованы при взаимодействии с экстренными службами. На данном этапе речь идет не о непосредственной интеграции с действующей Системой-112, а о задании логики такого взаимодействия: обнаружение признаков ДТП, определение места происшествия, формирование сообщения и последующая передача информации ответственному оператору или диспетчерской системе.

Ограничения предлагаемой модели связаны с тем, что ее практическое применение требует дополнительной технической и организационной проработки. В первую очередь необходимо обеспечить устойчивую обработку видеопотока в режиме, близком к реальному времени, поскольку задержка при выявлении ДТП снижает ценность автоматизированного реагирования. Кроме того, алгоритмы компьютерного зрения должны корректно работать при различном качестве изображения, изменении освещенности, погодных условиях, высокой плотности транспортного потока и частичном перекрытии объектов. Отдельной задачей остается практическая реализация канала передачи сформированного сообщения: необходимо определить технический способ взаимодействия с действующими информационными системами, порядок проверки достоверности события и регламент передачи сведений ответственным службам. Поэтому на данном этапе предлагаемая система рассматривается как концептуальная модель.

В статье рассмотрена концептуальная модель киберфизической системы обнаружения дорожно-транспортных происшествий на основе городского видеонаблюдения. Предложенный подход опирается на использование уже существующей городской инфраструктуры и предполагает последовательную обработку видеопотока: от получения данных с камеры и их предварительной подготовки до анализа дорожной сцены, выявления признаков возможного ДТП и формирования сигнала экстренного реагирования. Рассмотренная модель показывает, что городские камеры могут использоваться не только для фиксации событий, но и как источник данных для интеллектуального мониторинга дорожной обстановки. Дальнейшее развитие данного направления связано с повышением устойчивости алгоритмов компьютерного зрения, обеспечением обработки видеопотока в режиме, близком к реальному времени, и проработкой механизмов взаимодействия с действующими системами экстренного реагирования.

Список используемых источников

1. Городская система видеонаблюдения. О системе. URL: <https://video.dit.mos.ru/o-sistem/> (дата обращения: 26.05.2026).
2. К зиме готовим не только транспорт, но и светофоры // Московский транспорт. URL: https://transport.mos.ru/mostrans/all_news/127087 (дата обращения: 26.05.2026).
3. Дорожно-транспортная аварийность в Российской Федерации за 6 месяцев 2025 года // Научный центр безопасности дорожного движения МВД России. URL: <https://media.mvd.ru/files/embed/13561246> (дата обращения: 26.05.2026).
4. Хусаинов Р. М., Талипов Н. Г., Катасев А. С., Шалаева Д. В. Интеллектуальная система анализа транспортных потоков в автоматизированных системах управления дорожным движением // Программные продукты и системы. 2024. С. 69-76. DOI: 10.15827/0236-235X.145.069-076.
5. Постановление Правительства РФ от 21.11.2011 № 958 «О системе обеспечения вызова экстренных оперативных служб по единому номеру “112”». URL: <https://mchs.gov.ru/dokumenty/623> (дата обращения: 26.05.2026).

THE CRYPTOCURRENCIES AND BLOCKCHAIN: RESPONSIBILITY AND POTENTIAL IN DIGITIZING GOVERNMENT ADMINISTRATION

Volynkin P., Popugaev D., Strelets K.

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

The article presents a conceptual model of a cyber-physical system for detecting road traffic accidents based on urban video surveillance. The possibility of applying computer vision methods to identify signs of an emergency situation is examined. The structure of the proposed system is considered, including a video analytics module, a road situation analysis unit, and a mechanism for generating an emergency response signal. The proposed approach is focused on the use of existing urban infrastructure and can be considered as a basis for the further development of intelligent transportation systems.

Key words: road traffic accident, cyber-physical system, urban video surveillance, computer vision, intelligent transportation systems

УДК 004.057.4

ГРНТИ 49.33.35

АНАЛИЗ АКТУАЛЬНЫХ МЕТОДОВ ЗАЩИТЫ ИНТЕРНЕТ-СОЕДИНЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ЭВОЛЮЦИИ КИБЕРУГРОЗ**И. В. Гвоздков, Ю. В. Денисова, А. Р. Кушнир**

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В условиях реалий цифровизации деятельности человека эволюционируют и уровень сложности киберугроз. В статье проводится комплексный анализ актуальных методов и протоколов защиты интернет-соединений. Рассматриваются особенности внедрения криптографического протокола TLS 1.3, архитектуры шифрования виртуальных частных сетей (OpenVPN, IPsec, WireGuard), а также механизмы защиты прикладного и транспортного уровней, такие как протокол QUIC (HTTP/3) и технологии безопасного разрешения имен DNS over HTTPS (DoH) и DNS over TLS (DoT). В контексте современной парадигмы безопасности проанализирована концепция нулевого доверия (Zero Trust Network Access) и оценены риски, связанные с постквантовыми вычислениями. На основе разработанной системы критериев осуществлена оценка эффективности исследуемых подходов.

информационная безопасность, интернет-соединение, TLS 1.3, WireGuard, QUIC, DoH, DoT, постквантовая криптография, Zero Trust Network Access

Современный этап развития информационных систем можно охарактеризовать стремительным ростом цифровизации человеческой деятельности. Повсеместное внедрение концепций интернета вещей (IoT), облачных вычислений и распределенных корпоративных экосистем приводит к тому, что фокус смещается от привычных условий работы к удаленному подключению, и не точечно, а глобально. Все это формирует новые концепции и требования к условиям передачи данных.

Параллельно с развитием защитных технологий наблюдается также и эволюция методов и направлений кибератак. Классические атаки, такие, как «человек посередине», спуфинг пакетов и инъекции трафика трансформируются, превращаясь в более скрытые, автоматизированные и адаптивные угрозы. Например, особую актуальность приобретает угроза так называемых атак типа «перехват сейчас, расшифровка позже» (SNDL) когда злоумышленники перехватывают огромные массивы данных, которые хоть и не могут расшифровать прямо сейчас, но смогут в будущем, нанеся огромный ущерб.

Таким образом традиционные методы защиты информации, которые были актуальны раньше, показывают уязвимость к новым типам угроз. Из этого следует цель работы, которая заключается в проведении системного анализа эффективности актуальных методов защиты сетевого трафика и определение оптимальных сценариев их практического применения на основе сбалансированных критериев безопасности и производительности. Это необходимо для систематизации новейших стандартов безопасности, а также для составления рекомендаций по их интеграции в современные системы, функционирующие в условиях возрастающей интенсивности и сложности кибератак.

Объектом исследования выступает процесс обеспечения безопасности передачи данных в глобальных и локальных сетях общего и ограниченного доступа. Предметом исследования являются математические модели, криптографические протоколы, архитектурные концепции и программно-аппаратные методы защиты интернет-соединений, которые появляются и применяются в современное время.

Теоретический фундамент обеспечения безопасности сетевого взаимодействия закладывался в работах таких авторов, как У. Диффи, М. Хеллман (протокол Диффи-Хеллмана; криптографический протокол, который позволяет двум сторонам получать общий секретный ключ для безопасного шифрования, обмениваясь данными по полностью открытому и прослушиваемому каналу связи) и Р. Ривест, А. Шамир и Л. Адлеман (алгоритм RSA, он же алгоритм ассиметричного шифрования, который обеспечивает безопасную передачу данных в интернете, защиту паролей, банковских транзакций и работу цифровых подписей).

Эволюционный путь защитных механизмов прошел от первых версий протокола SSL, содержавших критические архитектурные уязвимости, до современных версий TLS. Сетевой уровень, как правило, защищался стеком протоколов IPsec, который, несмотря на высокую степень надежности, обладает высокой сложностью и значительными накладными расходами на обработку заголовков пакетов. Появление альтернативных решений, таких как протокол OpenVPN, частично решило проблему гибкости настройки, однако он уязвим к блокировкам и имеет проблемы с производительностью.

Вообще, анализ современных публикаций показывает, что большинство исследований сфокусировано либо на узкоспециализированных аспектах, либо на локальных тестах производительности отдельных программ-

ных продуктов. При этом наблюдается заметный дефицит комплексных междисциплинарных исследований, которые объединяют анализ криптографической стойкости, оценку вычислительной эффективности и архитектурную совместимость новых протоколов с концепциями инфраструктуры нулевого доверия. Но для того, чтобы к этому перейти, стоит рассмотреть и классифицировать современные методы защиты. Их можно разделить на несколько групп.

Во-первых, это криптографические методы защиты транспортного и сетевого уровней. Тут можно выделить протокол TLS 1.3 [1]. Его отличие от предыдущей версии в том, что из него убрали тяжелые и устаревшие алгоритмы, например, алгоритмы с доказанной уязвимостью или недостаточной стойкостью. К ним можно отнести шифры RC4, DES, 3DES, алгоритм хеширования MD5, а также режим блочного шифрования CBC, который являлся источником уязвимостей типа «криптографический оракул» (когда при обработке данных в пакет добавляются специальные байты дополнения, используя которые злоумышленник может путем длительного перебора расшифровать зашифрованный текст по одному байту).

Помимо этого, была введена укороченная версия процедуры «рукопожатия», где требуется только один цикл приема-передачи данных и режим 0-RTT, который позволяет клиенту отправлять зашифрованные данные прикладного уровня в первом же пакете при повторном установлении соединения с сервером.

На сетевом уровне появился и стал широко внедряться протокол WireGuard – современный быстрый и простой протокол с открытым исходным кодом, который используется для создания безопасных VPN-соединений. Он работает по принципу шифрования «точка-точка» и обеспечивает высокую скорость интернета при минимальной нагрузке на устройство, в отличие от IPsec и тяжеловесного OpenVPN.

Существенные изменения происходят и на стыке транспортного и прикладного уровней благодаря внедрению протокола QUIC, который лег в основу стандарта HTTP/3. Разработанный изначально корпорацией Google, QUIC переносит функции контроля доставки пакетов и мультимплексирования с уровня ядра на уровень пользователя, используя протокол UDP. Безопасность в QUIC интегрирована таким образом, что спецификация протокола вообще не предусматривает возможности функционирования без шифрования трафика. Интеграция с TLS 1.3 на глубоком системном уровне позволяет защищать не только полезную нагрузку, но и метаданные пакета,

что существенно усложняет проведение пассивного анализа трафика злоумышленниками.

К следующей группе можно отнести архитектурные и концептуальные методы. В этой области тоже происходят существенные изменения, так как традиционная модель сетевой безопасности основана, как правило, на защите периметра. Например, VPN работают по принципу «туннеля и замка», где пользователь после успешной аутентификации использует защищенный канал связи и ip-адрес внутри доверенной корпоративной сети. Изначальный межсетевой экран уступил место NGFW, который не просто анализирует ip-адреса и порты, но и контролирует приложения, выполняет глубокую проверку пакетов, фильтрацию URL и так далее. Сигнатурные IDS/IPS выявляют вредоносную активность в сети, сверяя проходящий трафик с базой данных известных угроз (сигнатур). Однако все они базируются на бинарной логике доверия и реактивных правилах. Например, VPN же предполагает неявное доверие к внутренней сети после прохождения аутентификации, что создает уязвимость к таким угрозам, как, например, «lateral movement», когда злоумышленник, получив доступ к одному из устройств в сети и компрометировав его, начинает продвигаться по сети, используя штатные сетевые протоколы и инструменты администрирования. В итоге выходит, что в условиях гибридной работы VPN не способен реализовать принцип минимальных привилегий: пользователь получает избыточный доступ ко всей подсети, а не к конкретному приложению. Статические правила фильтрации не способны масштабироваться в условиях высокой энтропии современного трафика, а ручное обновление политик создает критические задержки в цикле OODA, из-за чего вступает в силу эффект домино, когда задержка на одном этапе приводит к тому, что все остальные действия совершаются с опозданием и становятся неэффективными.

Таким образом, размывание границ сети из-за миграции компаний в облачные сервисы, а также использование сотрудников для работы личные устройства обусловило переход к концепции так называемого нулевого доверия – Zero Trust Network Access. Как следует из названия, эта концепция подразумевает правило «никому не доверять, всегда проверять». В рамках этой архитектуры сам факт нахождения пользователя внутри доверенной сети не является основанием для того, чтобы предоставлять ему доступ к ресурсам. В этом случае происходит постоянная проверка, каждое интернет-соединение аутентифицируется и авторизуется в режиме реального времени на основе контекстных данных, таких как, например, поведение

устройства в сети, его географическое положение, состояние и так далее. Защита соединений в этом случае реализуется через построение динамических микросегментированных зашифрованных туннелей между субъектом и конкретным приложением. Это не дает возможности злоумышленнику при компрометации одного устройства перемещаться внутри сети. Развитие этой концепции привело к созданию технологического стека SASE, который объединяет сетевые функции и функции обеспечения безопасности в единую облачную сервисную платформу.

Третья группа – это защита на уровне системы доменных имен, т.е. DNS. Изначально этот протокол не поддерживал механизмы шифрования, из-за чего было не сложно перехватывать, фильтровать и подменять DNS-ответы. Для того, чтобы эта уязвимость убрать, разработали такие стандарты, как DNS over TLS, он же DoT, и DNS over HTTPS, он же DoH [2]. Первый инкапсулирует DNS-запросы в выделенный TLS-туннель, использующий порт 853. Это позволяет гарантировать подлинность DNS-сервера и конфиденциальность запросов. Только сам факт использования DoT все еще легко идентифицируется по специфическому порту. Технология DoH решает эту проблему путем смешивания DNS-запросов с общим потоком HTTPS-трафика, проходящего через стандартный порт 443.

Из всего вышенаписанного можно выделить основные методы защиты, которые будут актуальны в ближайшее время. Например, упоминалась такая угроза, как SNDL, когда перехватываются крупные массивы секретных данных. Несмотря на то, что сейчас их невозможно расшифровать, это станет возможным в ближайшем будущем с помощью квантовых вычислений. Так, алгоритм Шора, запущенный на квантовом компьютере достаточной мощности, способен за вполне реальное время решать задачи факторизации больших целых чисел и дискретного логарифмирования. Это означает, что реален одномоментный взлом всех широко используемых асимметричных алгоритмов (таких, как RSA, ECC, Диффи-Хеллмана), обеспечивающих защиту при первичном согласовании интернет-соединений.

Ответом на данную угрозу является разработка алгоритмов постквантовой криптографии, основанных на математических задачах, решение которых остается трудновыполнимым как для классических, так и для квантовых систем (например, криптография на решетках, многочленах или кодах исправления ошибок). В настоящее время ведущие ИТ-компании проводят интеграцию гибридных схем шифрования в браузеры и TLS-стеки для обеспечения упреждающей защиты данных.

В итоге можно сказать, что в нынешнее время не существует единого протокола, который способен решить весь комплекс задач безопасности. Наибольшую эффективность демонстрирует концепция эшелонированной защиты (Defense-in-Depth), т.е. многоуровневый подход к обеспечению безопасности, при котором система защиты разделяется на несколько независимых уровней, каждый из которых имеет свои меры безопасности. Цель такого подхода в том, чтобы значительно затруднить проникновение злоумышленника через контур защищенной системы, так как ему придется преодолеть несколько независимых барьеров одновременно. Например, интеграция TLS 1.3 и QUIC на прикладном уровне в сочетании с DoH для защиты адресных запросов формирует один из элементов защиты в рамках этой концепции. Если говорить о корпоративных сетях, то там можно выделить WireGuard, который имеет превосходство в скорости обработки пакетов. Сверху над всем этим руководит принцип ZTNA, гарантирующей динамическую верификацию параметров безопасности каждого интернет-соединения.

В ходе проведенного исследования выполнен системный анализ состояния методов и технологий защиты данных. На основе результатов можно сформулировать следующие ключевые выводы:

Во-первых, переход на протокол TLS 1.3 и его интеграция с QUIC (HTTP/3) позволили разрешить противоречие между безопасностью и производительностью, благодаря чему существенно снижены задержки при установлении соединений при одновременном исключении заведомо слабых криптографических алгоритмов.

Во-вторых, технологии DoH и DoT в свою очередь устранили историческую уязвимость инфраструктуры DNS, переведя процесс разрешения доменных имен в плоскость полностью защищенных соединений. При этом стоит отметить, что это потребовало пересмотра систем корпоративного мониторинга сетевого трафика.

В-третьих, традиционный подход к сетевой безопасности исчерпал себя, уступив место архитектуре нулевого доверия (ZTNA), которая рассматривает каждое интернет-соединение как потенциально скомпрометированное до момента прохождения непрерывной контекстной верификации.

В заключении стоит отметить, что ключевым вектором развития систем защиты интернет-соединений на ближайшее время становится переход на постквантовые алгоритмы шифрования. Несмотря на текущие проблемы с размером ключей и расходами, внедрение гибридных PQC-схем заранее

является важным шагом для нейтрализации долгосрочной угрозы расшифровки секретного трафика.

Список используемых источников

1. Rescorla E. The Transport Layer Security (TLS) Protocol Version 1.3. // RFC 8446. IETF, 2018. URL: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc8446> (дата обращения: 15.05.2026).
2. Hoffman P., McManus P. DNS Queries over HTTPS (DoH). // RFC 8484. IETF, 2018. URL: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc8484> (дата обращения: 15.05.2026).

Статья представлена кандидатом технических наук, доцентом кафедры СОД СПбГУТ Ю. М. Боромянским.

ANALYSIS OF CURRENT METHODS FOR PROTECTING INTERNET CONNECTIONS IN THE CONTEXT OF EVOLVING CYBER THREATS

Gvozdkov I., Denisova Yu., Kushnir A.

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

In the context of the digitalization of human activities, the complexity of cyber threats is also evolving. This article provides a comprehensive analysis of current methods and protocols for protecting internet connections. It examines the implementation of the TLS 1.3 cryptographic protocol, the architecture of virtual private networks (OpenVPN, IPsec, and WireGuard), as well as the mechanisms for protecting the application and transport layers, such as the QUIC (HTTP/3) protocol and the secure DNS over HTTPS (DoH) and DNS over TLS (DoT) technologies. In the context of the modern security paradigm, the concept of zero trust (Zero Trust Network Access) is analyzed and the risks associated with post-quantum computing are assessed. Based on the developed system of criteria, the effectiveness of the studied approaches is evaluated.

Key words: information security, internet connection, cryptographic protocols, TLS 1.3, WireGuard, QUIC, DNS over HTTPS, post-quantum cryptography, Zero Trust

УДК 004.056.53

ГРНТИ 20.15.05

МОДЕЛЬ УГРОЗ ДЛЯ ПЛАТФОРМЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКИХ СКРИПТОВ И РАСШИРЕНИЯ БРАУЗЕРА: STRIDE/ATT&СК, РИСК-ОРИЕНТИРОВАННАЯ ПОЛИТИКА ПУБЛИКАЦИИ И ЗАПУСКА

И. В. Гвоздков, Э. Г. Омаров, Ю. Я. Перевозник

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Платформы распространения пользовательских скриптов совместно с расширениями браузера формируют среду исполнения стороннего кода, тесно связанную с пользовательскими данными и контекстом веб-сайтов. В работе предложена компактная модель угроз для архитектуры «веб-платформа каталога скриптов + расширение браузера (MV3)», основанная на DFD с границами доверия и классификации STRIDE. Показано, что ключевые риски сосредоточены в цепочке публикации и обновления версий, в механизмах доставки артефактов, а также в политике автозапуска на сайтах при избыточных разрешениях. Сформулирована риск-ориентированная политика публикации и запуска, включающая меры контроля целостности версий, двухэтапное распространение обновлений, минимизацию доменных разрешений расширения, ограничения автозапуска и коррелируемый аудит событий.

модель угроз, STRIDE, браузерные расширения, Manifest V3, пользовательские скрипты, управление рисками, политика публикации, контроль целостности, аудит

Механизмы расширяемости браузера – пользовательские скрипты и расширения – стали массовым способом автоматизации и персонализации веб-сервисов [1]. Одновременно они задают особую модель риска: код третьих лиц исполняется рядом с пользовательскими данными и может воздействовать на поведение веб-страниц, сетевые запросы и интерфейсы. Для каталогов скриптов эта проблема усиливается тем, что платформа выступает каналом доставки исполняемого кода и фактически версий. В более широком контексте цифровой трансформации рост значимости цифровых платформ повышает требования к управляемости информационных потоков и доверия [2], что делает вопросы безопасности доставки и исполнения кода прикладной задачей устойчивости цифровой инфраструктуры [3].

Целью работы является построение модели угроз для связки платформы распространения скриптов и расширения браузера и разработка

риск-ориентированной политики публикации и запуска, пригодной для инженерной реализации [4]. Вклад статьи заключается в формализации компонентов и границ доверия, описании ключевых точек атаки, систематизации угроз по STRIDE и сведении мер защиты в компактные правила принятия решений о публикации, обновлении и автозапуске.

Рассматриваемая система включает серверную платформу и клиентское расширение браузера. Серверная часть представлена веб-интерфейсом и API, базой данных, в которой хранятся учетные записи, роли, статусы модерации и метаданные версий, а также хранилищем артефактов, где размещаются исходники или сборки скриптов и история версий. Отдельно выделяется подсистема аудита, фиксирующая события жизненного цикла артефактов: публикации, решения модерации, выдачу версий и обращения со стороны расширения [5].

Клиентская часть – расширение браузера в парадигме Manifest V3 – включает service worker, обеспечивающий получение версий, применение политик запуска и управление локальным состоянием, а также UI-компоненты для настройки. Исполнение на сайтах происходит через контентные контексты, где скрипт взаимодействует со страницей и инициирует действия в пределах разрешений расширения. Принципиально важна граница между «миром страницы» и «миром расширения», поскольку она определяет допустимые каналы взаимодействия и ограничения на доступ к данным.

Активы системы охватывают учетные записи и сессии пользователей и авторов, артефакты версий скриптов (публичные и приватные), настройки расширения и наборы доменных разрешений, журналы аудита и репутационные показатели каталога, а также пользовательские данные на посещаемых сайтах [1]. В модели угроз наиболее значимы границы доверия «браузер–сервер», «расширение–сайт» и «пользователь–платформа–автор», поскольку в каждом из этих переходов возможно несоответствие ожиданий доверия реальному уровню контроля.

Для систематизации угроз используется STRIDE, позволяющий классифицировать риски как подмену, вмешательство, оспаривание действий, разглашение информации, отказ в обслуживании и повышение привилегий. Такой подход удобен для привязки угроз к элементам DFD и для формирования полного перечня опасных ситуаций, возникающих в цепочке «публикация → доставка → установка → запуск → обновление/отзыв». Риск-оценка выполняется качественно по двум шкалам: вероятности реали-

зации (Likelihood, 1–5) и ущерба (Impact, 1–5), что позволяет выделить меры, уменьшающие вероятность атак в канале публикации и доставки, а также меры, ограничивающие масштаб последствий при запуске на стороне пользователя.

Потоки данных в системе включают загрузку версии автором, хранение и выдачу артефактов платформой, получение версии расширением, локальное сохранение состояния установок и запуск скриптов на целевых сайтах. В качестве внешних сущностей выступают автор, пользователь, модератор (если предусмотрен процесс проверки) и внешние сайты, на которых выполняются скрипты. Внутренние процессы включают обработку публикации, проверки и выдачи версий, а также применение правил запуска в расширении.

С практической точки зрения модель угроз концентрируется на точках, через которые атакующий может внедрить или изменить исполняемый код либо расширить область его выполнения. К ключевым точкам входа относятся:

- публикация скрипта и загрузка новой версии (артефакт и метаданные);
- обновление версии и смена статусов/владельца;
- доставка артефактов и метаданных (API выдачи, хранилище, кэширование);
- автозапуск по URL-паттернам и обработка SPA-навигации;
- запрос и изменение доменных разрешений расширения;
- межкомпонентные сообщения расширения (UI ↔ service worker ↔ content scripts);
- отзыв версии и аварийная остановка (kill-switch).

Каталог угроз привязан к перечисленным потокам и активам и рассматривает платформу и расширение как единый контур управления риском. Для сокращения объема основной перечень соответствий «угроза–компонент–последствие–мера» сведен в таблицу 1, а далее поясняется содержание каждого класса STRIDE применительно к архитектуре. Оценки L и I приведены ориентировочно по шкале 1–5 и используются для выделения первоочередных контролей.

ТАБЛИЦА 1 – Угрозы и контроли (STRIDE → компонент → риск → мера)

STRIDE	Компонент/ граница	Пример угрозы	Последствие	L	I	Приоритетная мера
S	Платформа: сессии/ аккаунты	Компрометация автора и публикация обновления	Массовое за- ражение через доверенный канал	4	5	MFA, риск-скоринг входа, двухэтапная публикация
T	Хранилище версий/ доставка	Подмена артефакта версии	Supply-chain, скрытая мо- дификация кода	3	5	Неизменяемость версии, хэши и подпись артефактов
R	Аудит	Оспаривание факта публикации/ отзыва	Невозмож- ность рассле- дования, спор с модерацией	3	4	Коррелируемый аудит «публикация – выдача – установка – запуск»
I	Расширение ↔ сайт	Экспфильтрация данных со страниц	Утечка ПДн/учетных данных на сайтах	4	5	Минимальные host-permissions, подтверждения на чувствительных доменах
D	Расширение: автозапуск	Массовые запуски/тяжелые обработчики	Тор- моза/краши, отказ в обслу- живании	3	3	Лимиты автоза- пуска, safe mode, быстрый kill-switch
E	Платформа: роли/права	Ошибка автори- зации → доступ к модерации	Обход прове- рок, публика- ция без ревью	2	5	Жесткое RBAC, тесты прав, разделе- ние обязанностей

Угрозы Spoofing сводятся к компрометации аккаунтов авторов или администраторов, что позволяет злоумышленнику выпускать вредоносные обновления от имени доверенного лица. Tampering критичен для цепочки поставки: без неизменяемости версий и криптографической привязки артефактов возможна скрытая подмена кода в хранилище или при доставке. Repudiation усиливает ущерб при отсутствии сквозной корреляции событий (публикация → выдача → запуск), затрудняя расследование и отзыв версий. Information Disclosure включает утечки приватных скриптов из-за ошибок платформы и компрометацию пользовательских данных на сайтах через вредоносные скрипты. DoS реализуется через агрессивный автозапуск на клиенте или злоупотребление API на сервере. Elevation of Privilege опасен при ошибках в ролевой модели платформы и при избыточных разрешениях расширения, масштабирующих последствия любой атаки.

Для актуализации перечня угроз и практического сопоставления с типовыми угрозами безопасности информации целесообразно использовать Банк данных угроз ФСТЭК России как официальный источник сведений об угрозах и их обновлениях [6].

Политика публикации рассматривает каждую версию как отдельный объект риска, зависящий от репутации автора и поведения кода. Базовый набор мер включает статический анализ, обязательное ревью и двухэтапное распространение для обновлений с высоким риском. Критически важна неизменяемость опубликованных версий, подкреплённая хэшированием и цифровой подписью артефактов: это предотвращает скрытую подмену кода и ограничивает скорость распространения вредоносных обновлений [1].

Политика запуска опирается на принцип наименьших привилегий: доменные разрешения должны быть максимально узкими, с обязательным подтверждением для чувствительных сайтов. Для снижения ущерба вводятся лимиты автозапуска и механизм аварийного отключения (kill-switch), позволяющий мгновенно остановить исполнение проблемной версии. Эти меры дополняются сквозным аудитом, который связывает события публикации и выдачи с фактами запуска скрипта на стороне пользователя.

Эффективность предложенного набора мер целесообразно оценивать через показатели, отражающие снижение риска и качество эксплуатации платформы [4]. В качестве практического набора метрик могут использоваться:

- изменение Likelihood и Impact для ключевых строк таблицы 1 после внедрения контролей;
- время обнаружения и отзыва проблемной версии (включая срабатывание kill-switch);
- доля ложных срабатываний автоматических проверок и модерации;
- доля инцидентов, для которых аудит позволяет восстановить цепочку «версия–выдача–установка–запуск».

В данной статье предложена модель угроз для единой экосистемы «веб-платформа + расширение MV3». Анализ на базе DFD и STRIDE показал, что основные риски связаны с компрометацией авторов, supply-chain атаками на цепочку поставки и избыточными разрешениями расширения. Разработанная политика нивелирует эти угрозы через неизменяемость и подпись версий, двухэтапное распространение, минимизацию прав и аварийную остановку исполнения. Предложенные метрики позволяют оцени-

вать эффективность защиты через снижение вероятности и ущерба, а также скорость реагирования на инциденты.

Список используемых источников

1. Башмаков А. И. Интеллектуальные информационные технологии. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. 298 с.
2. Интернет-коммуникации в деятельности органов государственной власти и местного самоуправления: практики и стратегии развития: материалы всерос. науч.-практ. конф., Ульяновск, 16–17 дек. 2022 г. Ульяновск: УлГТУ, 2023. С. 1-120. URL: [https://lib.ulstu.ru/venec/disk/2023/5.pdf] (дата обращения: 28.02.2026).
3. Анализ текущего состояния развития цифровой экономики в России: отчет / Ин-т развития информационного общества. М., 2018. 166 с. URL: [https://iis.ru/wp-content/uploads/2020/12/DECARussia2018rus.pdf] (дата обращения: 01.03.2026).
4. Пэйн Ц. Роль интеллектуальных технологий во внешней коммуникации // КиберЛенинка. URL: [https://cyberleninka.ru/article/n/rol-intellektualnyh-tehnologiy-vo-vneshney-kommunikatsii] (дата обращения: 02.03.2026).
5. Стратегия цифровой трансформации отрасли науки и высшего образования: утв. Минобрнауки России. М., 2022. URL: [https://clck.ru/3UsYvN] (дата обращения: 03.03.2026).
6. ФСТЭК России. Банк данных угроз безопасности информации (БДУ): официальный ресурс. URL: [https://bdu.fstec.ru/] (дата обращения: 04.03.2026).

THREAT MODEL FOR THE USER SCRIPT DISTRIBUTION PLATFORM AND BROWSER EXTENSIONS: STRIDE/ATT&CK, RISK-BASED PUBLISHING AND LAUNCH POLICY

Gvozdkov I., Omarov E., Perevoznik T.

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

User script distribution platforms, together with browser extensions, form a third-party code execution environment that is closely related to user data and the context of websites. The paper proposes a compact threat model for the architecture "script catalog web platform + browser extension (MV3)" based on DFD with trust boundaries and STRIDE classification. It is shown that the key risks are concentrated in the chain of publishing and updating versions, in the mechanisms of artifact delivery, as well as in the policy of autorun on sites with excessive permissions. A risk-based publication and launch policy has been formulated, including version integrity control measures, two-stage distribution of updates, minimizing domain extension permissions, autorun restrictions, and correlated event auditing.

Key words: threat model, STRIDE, browser extensions, Manifest V3, user scripts, risk management, publication policy, integrity control, audit

УДК 004.891.3

ГРНТИ 28.23.13

ФОРМИРОВАНИЕ ТРЕХУРОВНЕВОЙ МОДЕЛИ ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО СООТВЕТСТВИЯ ДЛЯ ЗАДАЧ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОМПЛЕКТОВАНИЯ ПРОЕКТНЫХ КОМАНД

Д. Г. Горохов, А. О. Жаранова

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Статья посвящена разработке формальной модели соответствия специалиста роли в команде для задачи автоматизированного комплектования проектных ИТ-команд. Проведен анализ ограничений классической модели Person-Job-Fit. Предложена трехуровневая модель Person-Role-Team Fit, формализующая совместимость как функцию профиля специалиста, требований роли и текущей конфигурации команды. Описана структура векторного пространства компетентностных профилей и ролевая матрица весов. Обсуждается применимость модели в системах поддержки принятия решений для HR-аналитики в ИТ-организациях.

соответствие специалиста роли, компетентностный профиль, командная совместимость, система поддержки принятия решений, формирование команды, HR-аналитика

Реализация современных ИТ-проектов осуществляется проектными командами с распределением ролей в области проектного менеджмента, бизнес-анализа, архитектуры, разработки, обеспечения качества и фасилитации. От качества подбора команды напрямую зависят сроки реализации, бюджет проекта и итоговое качество продукта. На практике решения о составе команды принимаются HR-специалистами и руководителями проектов в условиях неопределенности и неполной информации, преимущественно на основе личного опыта [1].

Существующие промышленные инструменты автоматизации подбора кадров, в число которых входят системы автоматизированного отбора резюме, рекомендательные сервисы кадровых агентств, корпоративные HR-платформы, ориентированы на оценку отдельного кандидата относительно требований одной должности. Данный подход, известный в организационной психологии как Person-Job Fit (PJ-Fit), формализуется через меру сходства между вектором характеристик специалиста и вектором требований

должности [2, 3]. Применительно к задаче формирования ИТ-команд PJ-Fit обладает рядом структурных ограничений, делающих невозможным построение на его основе обоснованной системы поддержки принятия решений (СППР) для командного подбора.

Первое ограничение – отождествление должности и роли. Должность представляет собой формализованную позицию в штатном расписании, тогда как роль определяется набором компетенций, необходимых для выполнения деятельности в конкретном проектном контексте. Отраслевые стандарты компетенций SFIA 9 [4] и BABOK явно указывают, что один и тот же профессиональный стандарт может реализовываться через различные ролевые профили в зависимости от типа проекта.

Второе ограничение – независимая оценка кандидатов. Жадный алгоритм для выбора лучших по PJ-Fit кандидатов на каждую роль не учитывает командного контекста, то есть компетентностные пробелы и дублирования между ролями остаются неучтенными. Локально-оптимальный по PJ-Fit состав команды нередко оказывается субоптимальным с точки зрения проектного результата.

Третье ограничение – симметричная оценка кандидата вне зависимости от стадии комплектования. PJ-Fit не различает ситуации, когда специалист добавляется первым в пустую команду или когда он завершает уже сформированный состав. Между тем добавление специалиста представляет собой операцию над всей конфигурацией команды, а не над отдельной парой «человек – роль».

Указанные ограничения актуализируют разработку расширенной модели соответствия, явно учитывающей трехуровневую структуру задачи.

Предлагаемая трехуровневая модель Person-Role-Team Fit описывает соответствие специалиста через совместимость на трех взаимосвязанных уровнях: индивидуальное соответствие специалиста требованиям роли (Person-Role), соответствие специалиста командной конфигурации (Role-Team) и соответствие команды проектному контексту (Team-Project). Каждый уровень характеризуется собственным набором входных данных и собственной интерпретацией выходного результата.

Уровень 1 – Person-Role. Оценивается индивидуальное соответствие специалиста требованиям конкретной роли. Входные данные: компетентностный профиль специалиста (вектор баллов по субкомпетенциям, оцениваемых по шкале SFIA от 1 до 7) и описание роли – вектор нормативных требований к компетенциям и вектор весов значимости каждой компетен-

ции для данной роли. Выходные данные: числовая оценка соответствия от 0 до 1, где 1 – точное покрытие требований, 0 – полное несоответствие. На этом уровне реализуется идея взвешенного расстояния между требованиями и профилем, при которой превышение специалистом нормативных требований не штрафует, то есть «избыточная квалификация» по отдельной компетенции не ухудшает результат.

Уровень 2 – Role-Team. Оценивается, насколько добавление специалиста на роль улучшает уже сформированную часть команды. Входные данные: компетентностный профиль кандидата, профиль команды (агрегированный из профилей уже назначенных специалистов) и требования всех ролей проекта. Выходные данные: оценка вклада специалиста в командное покрытие проектных требований, учитывающая два аспекта: расширение перечня закрытых требований (покрытие) и сокращение командных компетентностных разрывов. Принципиально, что этот уровень асимметричен: один и тот же специалист может получить разную оценку в зависимости от того, на каком шаге комплектования он добавляется в команду.

Уровень 3 – Team-Project. Оценивается соответствие команды как целого требованиям проекта. Входные данные: полная конфигурация команды (все назначения «специалист – роль») и описание проекта (множество ролей с требованиями и весами). Выходные данные: интегральный показатель совместимости команды с проектом, агрегирующий оценки нижних уровней по всем ролям, а также карта разрывов – перечень компетенций, по которым команда не соответствует проектным требованиям. Данный уровень обеспечивает практическую ценность для руководителя проекта, так как команды сравниваются не по абстрактной «квалификации», а по их соответствию конкретному проектному контексту.

Все три уровня модели данных оперируют двумя ключевыми структурами: векторным пространством компетентностных профилей и ролевой матрицей весов. Пространство компетентностных профилей определяется как множество всех возможных оценок специалиста по фиксированному набору из n субкомпетенций, формирующих предметную область проекта. Каждый специалист, как и нормативные требования каждой роли, представлены точкой этого пространства – вектором размерности n со значениями в диапазоне от 0 до L (для шкалы SFIA принято $L = 7$). Геометрически близость двух профилей в данном пространстве соответствует их сходству по уровню владения компетенциями; алгебраически она измеряется взвешенным евклидовым расстоянием, что позволяет количественно сравнивать

специалистов между собой, агрегировать индивидуальные профили в командный и сопоставлять командный профиль с требованиями проекта.

Ролевая матрица весов представляет собой таблицу размерности $m \times n$, где m – число ролей проекта. N – число субкомпетенций. Каждая ячейка матрицы соответствует весу значимости конкретной субкомпетенции для конкретной роли: чем выше значение, тем больший вклад данная субкомпетенция вносит в итоговую оценку соответствия. Веса в каждой строке матрицы нормированы к единице, что обеспечивает сопоставимость оценок между ролями. Принципиальная особенность модели заключается в том, что матрица весов является нормативным артефактом, то есть разрабатывается путем содержательного анализа профессиональных стандартов и согласования с экспертами предметной области по методу Дельфи, а не извлекается из обучающих данных. Подобный подход обеспечивает прозрачность и интерпретируемость рекомендаций СППР для руководителей проектов и HR-специалистов.

Совместимость специалиста i с ролью r в команде T при выполнении проекта P определяется как произведение двух компонент – индивидуальной (Person-Role) и командной (Role-Team):

$$F(i, r, T, P) = f_{PJ}(i, r) \cdot f_{PT}(i, r, T, P),$$

где f_{PJ} – компонент индивидуального соответствия (взвешенное расстояние между вектором требований роли и профилем специалиста, нормированное к диапазону $[0, 1]$); f_{PT} – компонент командной совместимости, оценивающий вклад специалиста в покрытие проектных требований с учетом штрафа за непокрытые компетенции. Мультипликативная связь компонент отражает существенное свойство модели, при котором высокий индивидуальный балл не компенсирует слабого вклада в команду, и наоборот.

Глобальная задача комплектования команды формулируется как поиск назначения специалистов на роли, максимизирующего суммарную совместимость по всем ролям проекта:

$$\sigma^* = \operatorname{argmax}_{\sigma} \sum_{r \in R(P)} F(\sigma(r), r, T(\sigma), P),$$

где σ – назначение, то есть сопоставление каждой роли проекта специалисту из пула; σ^* – искомое оптимальное назначение; $R(P)$ – множество ролей проекта P ; $T(\sigma)$ – команда, формируемая назначением σ . Требуется, чтобы назначение было инъективным: один и тот же специалист не может занимать несколько ролей одновременно. Задача относится к классу комбина-

торных задач оптимизации в дискретном пространстве и сводится к классической задаче формирования команды Team Formation Problem [5], для которой установлена NP-полнота. Подобное обуславливает невозможность точного решения за приемлемое время на экземплярах задачи реалистичного масштаба и обосновывает применение метаэвристических методов: генетических алгоритмов, алгоритмов имитации отжига, роевых алгоритмов.

Трехуровневая модель PRT-Fit служит математическим ядром СППР для автоматизации задач кадрового планирования в ИТ-организациях. Сценарии ее применения охватывают как оперативные задачи руководителя проекта, так и стратегические HR-процессы организации, а также архитектурную интеграцию с существующими ИТ-решениями.

В оперативном режиме СППР решает две взаимосвязанные задачи. Первая – подбор команды для проекта: получив на вход описание проекта (роли с требованиями и весами) и пул доступных специалистов, система возвращает рекомендуемый состав команды с обоснованием каждого назначения. Данный подход особенно ценен для проектов с регуляторно-критичными требованиями (например, Fintech-разработка), где компетентностные разрывы могут привести к существенным потерям. Вторая задача – аналитика командных разрывов: для уже сформированной команды СППР строит карту компетенций, по которым команда не соответствует требованиям проекта. Данная информация служит основой для решений о привлечении внешних экспертов, организации обучения внутри команды или передаче отдельных задач на аутсорсинг. В отличие от классических HR-метрик, таких как средний уровень владения навыком, карта разрывов формируется в контексте конкретного проекта и привязана к ролевой структуре, а не к абстрактным позициям в штатном расписании.

На уровне организации агрегация результатов работы СППР по портфелю проектов позволяет выявлять системные кадровые дефициты, то есть компетенции, по которым организация испытывает устойчивый недостаток на нескольких проектах одновременно. Такая аналитика служит основой для среднесрочного планирования найма и программ корпоративного обучения. К отдельному классу задач относится поиск замены увольняющемуся специалисту: путем вычисления показателя PRT-Fit для всех потенциальных кандидатов из внутреннего и внешнего кадрового резерва система ранжирует варианты замены с учетом не только их индивидуальной квалификации, но и совместимости с уже сложившейся командой. В типовой ИТ-инфраструктуре крупной организации СППР на основе PRT-Fit естественно

встраивается в существующий контур HR-систем: компетентностные профили специалистов поступают из систем оценки персонала (Performance Management), а описания ролей и проектов – из систем управления проектами; итоговые рекомендации передаются в системы кадрового учета и планирования. Модульность модели, достигаемая за счет отдельной реализации компонент Person-Role и Role-Team, обеспечивает возможность независимой замены любой из них на альтернативную формулировку без переработки системы в целом.

Предложенная трехуровневая модель Person-Role-Team Fit преодолевает ключевые ограничения классической модели Person-Job Fit в части учета командного контекста и асимметрии добавления кандидатов. Разделение задачи на уровни Person-Role, Role-Team и Team-Project обеспечивает ее естественную интеграцию в архитектуру СППР для HR-аналитики, поддерживая широкий спектр сценариев от оперативного подбора команды для проекта до стратегического планирования кадрового состава ИТ-компании. Направления дальнейшего исследования включают разработку эффективных алгоритмов оптимизации задачи комплектования команд и эмпирическую валидацию модели на коммерческих ИТ-проектах.

Список используемых источников

1. Ларичев О. И. Теория и методы принятия решений: учебник. М.: Логос, 2000. 296 с.
2. Edwards J. R. Person-Job Fit: A Conceptual Integration, Literature Review and Methodological Critique // International Review of Industrial and Organizational Psychology. 1991. Vol. 6. PP. 283-357.
3. Kristof-Brown A. L., Zimmerman R. D., Johnson E. Consequences of Individual's Fit at Work: A Meta-Analysis of Person-Job, Person-Organization, Person-Group, and Person-Supervisor Fit // Personnel Psychology. 2005. Vol. 58(2). PP. 281-342.
4. SFIA: The global skills and competency framework for the digital world. URL: <https://sfia-online.org> (дата обращения: 15.04.2026).
5. Lappas T., Liu K., Terzi E. Finding a team of experts in social networks // Proceedings of the 15th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. 2009. PP. 467-476.

Статья представлена заведующим кафедрой ИУС СПбГУТ, кандидатом технических наук, доцентом В. Л. Литвиновым.

**FORMATION OF A THREE-LEVEL PROFESSIONAL FIT MODEL
FOR AUTOMATED COMPOSITION OF PROJECT TEAMS**

Zharanova A., Gorokhov D.

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

The article is devoted to the development of a formal model for matching a specialist to a team role in the context of automated composition of IT project teams. An analysis of the limitations of the classical Person-Job Fit model is conducted. A three-level Person-Role-Team Fit model is proposed, which formalizes compatibility as a function of the specialist's profile, role requirements, and the current team configuration. The structure of the vector space of competency profiles and the role weight matrix are described. The applicability of the model in decision support systems for HR analytics in IT organizations is discussed.

Key words: *person-role fit, competency profile, team compatibility, decision support system, team composition, HR analytics*

УДК 530.145.3

ГРНТИ 50.07.05

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ АВТОМОБИЛЬНЫХ ПРОБОК ПРИ ПЕРЕСЕЧЕНИИ ПЕРЕКРЕСТКА

А. Н. Губин, В. Л. Литвинов

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Важнейшей задачей организации дорожного движения, обеспечивающей повышение пропускной способности, безопасности и снижения задержек транспорта является эффективное управление транспортным потоком на перекрестках. Основная сложность в организации управления заключается в координации движения автомобилей с учетом правил дорожного движения, дорожных знаков, светофорного регулирования и поведения участников движения. В связи с этим, представляет интерес рассмотреть особенности организации управления светофором на перекрестке для обеспечения наиболее рационального режима пересечения перекрестка транспортным потоком и исключения возможности появления автомобильных пробок.

организации дорожного движения, управления светофором, распределение Пуассона

Перекрестки являются ключевыми узлами транспортной сети, где совмещается движение потоков транспортных средств по разным направлениям. Эффективное управление транспортным потоком на этих участках является одной из важнейших задач организации дорожного движения, направленной на повышение пропускной способности, безопасности и исключения возможностей появления пробок.

Управление транспортным потоком на перекрестках требует комплексного подхода, который включает в себя оценку дорожной обстановки, оптимизацию сигналов светофора и взаимодействия транспортных средств для обеспечения непрерывного и безопасного передвижения транспортных средств.

В статье рассматривается один из подходов к организации управления светофором с целью улучшения дорожной ситуации и исключения возможностей возникновения автомобильных пробок на перекрестках, который предусматривает использование регулярной модели проезда автомобилем перекрестка и вероятностной модели потока автомобилей, пересекающих перекресток.

Рассмотрим одностороннее движение по перекрестку заданной ширины d_3 со средней скоростью v без помех. В качестве модели проезда перекрестка примем подход Танака [1], который предусматривает определение среднего расстояния между автомобилями в потоке транспортных средств на перекрестке как

$$d(v) = L + c_1 v + c_2 v^2,$$

где v – заданная скорость движения, L – средняя длина автомобиля, c_1 – время принятия решения о движении, c_2 – коэффициент пропорциональности при определении тормозного пути.

Величину $d(v)$ часто называют динамической длиной автомобиля.

Для дальнейших исследований модифицируем представленную выше модель следующим образом.

Ограничим скорость автомобиля при движении по перекрестку величиной, при которой тормозной путь равен нулю, добавим в выражение для динамической длины автомобиля величину средней безопасной дистанции d_1 между транспортными средствами, тогда общая схема проезда перекрестка потоком автомобилей может быть представлена в следующем виде (рис. 1).

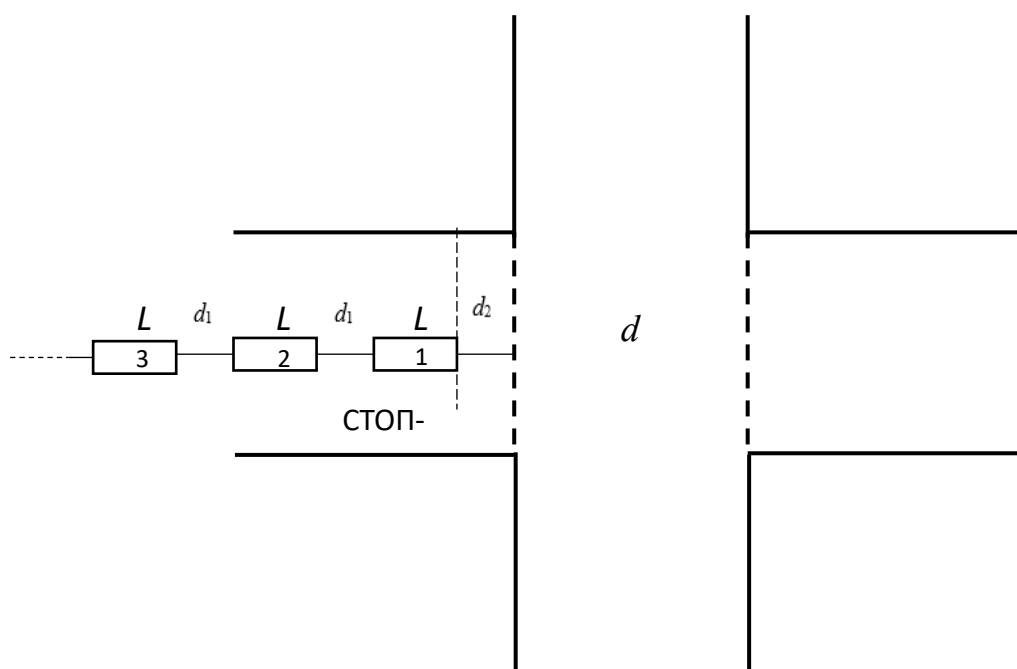


Рис. 1. Общая схема проезда перекрестка потоком автомобилей

Определим количество автомобилей, проехавших через перекресток за время T_1 горения разрешающего сигнала светофора.

Чтобы первая машина полностью освободила перекресток, ей необходимо проехать расстояние d_2 от стоп-линии до границы перекрестка, свою длину плюс ширину перекрестка d_3 :

$$S_1 = d_2 + L + d_3.$$

Для n -ого автомобиля длина пути для пересечения перекрестка, согласно схеме, составит

$$S_n = (n - 1)(L + d_1) + S_1.$$

Время проезда перекрестка для n -ого автомобиля составит

$$t_n = (n - 1)c_1 + \frac{(n-1)(L+d_1)+S_1}{v}.$$

Далее, из последнего выражения, можно определить количество автомобилей N , которые пересекут перекресток за время горения T_1 разрешающего сигнала светофора.

$$T_1 = (N - 1)c_1 + \frac{(N-1)(L+d_1)+S_1}{v},$$

откуда

$$N = 1 + \frac{vT_1 - S_1}{vc_1 + L + d_1}.$$

Очевидно, что для того, чтобы исключить образование пробки необходимо, чтобы количество автомобилей, прибывающих к перекрестку за время разрешающего (T_1) плюс время запрещающего (T_2) сигналов светофора, не превышало значения N , определяемого последним выражением. Без потери общности решения задачи можно предположить, что $T_1 = T_2 = T$.

Обычно предполагается, что поток автомобилей подчиняется распределению Пуассона [2].

Пуассоновский поток означает, что события (проезд автомобиля) независимы, средняя интенсивность потока постоянна, а число событий X за фиксированный промежуток времени t имеет распределение Пуассона:

$$P(X = k) = \frac{(\lambda t)^k}{k!} e^{-\lambda t}.$$

Далее определим интенсивность потока λ , при которой за заданное время t с вероятностью 0,95 количество автомобилей не превысит значения N (то есть, за время t все скопившиеся автомобили проедут перекресток).

$$P(X \leq N) = \sum_{k=0}^N \frac{(\lambda t)^k}{k!} e^{-\lambda t} = 0,95.$$

Для решения поставленной задачи используем таблицу квантилей распределения Пуассона [3] при заданном значении t и вычисленным значением N .

Пример. Пусть $L = 5$ м, $d_1 = d_2 = 5$ м, $d_3 = 20$ м, $v = 30$ км/час, $T = 30$ сек.

Количество автомобилей, проехавшие перекресток при заданных условиях составляет

$$N_3 = 1 + \frac{8,33 \cdot 30 - 30}{8,33 \cdot 1,5 + 5 + 5} \approx 10.$$

Определим значение интенсивности движения автомобилей, при которой вероятность того, что за время горения, разрешающего и запрещающего сигналов светофора будет составлять 0,95, то есть

$$P(X \leq 10) = \sum_{k=0}^N \frac{(\lambda \cdot 60)^k}{k!} e^{-\lambda \cdot 60} = 0,95.$$

По таблице распределения Пуассона [3] определим параметр μ для которого $P(X \leq 10) \approx 0,95$, который равен 6,24. Поскольку $\mu = 60 \cdot \lambda$, то искомое значение интенсивности движения составит $\lambda = 0,104$ автомобиля в секунду.

Если интенсивность потока автомобилей увеличится, допустим до величины $\lambda_1 = 0,165$, то при заданной ранее настройке светофора количество автомобилей перед перекрестком с вероятностью 0,95 составит $N_1 = 15$ автомобилей, то есть

$$P(X \leq 15) = \sum_{k=0}^{N_1} \frac{(\lambda \cdot 60)^k}{k!} e^{-\lambda \cdot 60} = 0,95.$$

Таким образом, после окончания рабочего цикла светофора перед перекрестком с вероятностью 0,95 окажется $\Delta = N_1 - N_3 = 5$ автомобилей.

Количество автомобилей в пробке N_{Π} за время t определится как

$$N_{\Pi} = \Delta \cdot \frac{t}{T_1 + T_2}.$$

Длина автомобильной пробки L_{Π} составит

$$L_{\Pi} = N_{\Pi} \cdot d(v),$$

где $d(v)$, учитывая принятые ограничения, определяется следующим выражением

$$d(v) = L + c_1 v + d_1.$$

С учетом данных, рассмотренных в примере, длина автомобильной пробки за время t составит:

$$L_{\text{п}} = \frac{5}{60} \cdot (5 + 2 \cdot 8,33 + 5) \cdot t = 2,22 \cdot t.$$

Для исключения возможности появления пробки необходимо увеличить зеленую фазу светофора до 48,5 секунд, тогда, при принятых условиях количество автомобилей, которые пересекут перекресток за время горения разрешающего сигнала светофора, составит ≈ 15 .

Полученные результаты могут быть использованы при организации управления транспортными потоками на перекрестках, в частности, возможно прогнозировать и исключать условия возникновения пробок перед светофором при пересечении перекрестка.

Список используемых источников

1. Введение в математическое моделирование транспортных потоков: Учебное пособие. Издание 2-е, испр. и доп. А. В. Гасников и др. Под ред. А. В. Гасникова. М.: МЦНМО, 2013. – 428 с.
2. Кингман Дж. Пуассоновские процессы. М.: МЦНМО, 2007. 136 с.
3. Вентцель Е. С., Овчаров Л. А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения. 2-е изд. М.: Высшая школа, 2000. 480 с.

PREDICTING TRAFFIC JAMS WHEN CROSSING AN INTERSECTION

Gubin A., Litvinov V.

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

Effective traffic flow management at intersections is the most important task of traffic management, ensuring increased capacity, safety and reduction of transport delays. The main difficulty in organizing management is to coordinate the movement of vehicles, taking into account traffic rules, traffic signs, traffic light regulation and the behavior of road users. In this regard, it is of interest to consider the specifics of traffic light management at the intersection to ensure the most rational mode of intersection traffic flow and eliminate the possibility of traffic jams.

Key words: traffic management, traffic light management, Poisson distribution

УДК 004.912

ГРНТИ 28.23.25

МЕТОДЫ АГРЕГАЦИИ ЭМБЕДДИНГОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ КЛАССИФИКАЦИИ ТЕКСТОВ

А. Н. Губин, В. Л. Литвинов, Ф. В. Филиппов

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Использование нейронных сетей для решения задач классификации текстов позволяет значительно увеличить точность по сравнению с традиционными методами машинного обучения. В основе подобных подходов лежит использование эмбеддингов. Для классификации текста необходимо агрегировать эмбеддинги отдельных слов в единый вектор. В статье рассмотрены различные методы агрегации эмбеддингов и их влияние на точность классификации.

обработка естественного языка, эмбеддинги, классификация текстов, LSTM

Классификация текстов является востребованной задачей обработки естественного языка [1-4]. Современный подход предполагает использование для этих целей эмбеддингов [5, 6], как для представления отдельных слов текстового документа, так и для документа в целом. Простые методы агрегации эмбеддингов слов для получения векторных представлений текстов являются эффективными, но игнорирование зависимостей между словами, приводит к потере семантической информации, что сказывается на точности классификации. В отличие от этого, использование моделей глубокого обучения (таких как LSTM) для непосредственной генерации контекста документа позволяет представлять общую семантическую информацию, избегая ее потери при упрощении всего текста до одного эмбеддинга [7]. На точность классификации текстов при использовании эмбеддингов влияет множество факторов.

Целью работы является изучение ряда аспектов, оказывающих влияние на точность анализа: влияние качества и типа (модель, размерность) эмбеддингов, влияние способов агрегации эмбеддингов, влияние характеристик (длина текста, субъективность классов, недостаточность информации) датасетов.

В качестве простейших методов агрегации эмбеддингов рассмотрим три: метод суммирования эмбеддингов, метод нахождения среднего и кон-

катенацию эмбедингов слов текста. Пусть у нас есть текст $T = [w_1, w_2, \dots, w_n]$, состоящий из n слов. Для каждого слова w_i есть его эмбединг $e_i \in R^d$, где d – размерность эмбединга.

Суммирование и среднее всех эмбедингов слов в тексте даст результирующий вектор той же размерности d :

$$E_{Sum} = \sum_{i=1}^n e_i \text{ и } E_{Mean} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_i.$$

Результирующий вектор после конкатенации $E_{Concat} = [e_1 e_2 \dots e_n]$ будет иметь размерность $n \times d$.

Для получения глобальных эмбедингов, сохраняющих семантическую информацию, будем использовать кодировщик на базе LSTM, аналогичный описанному в [8]. При этом, исследуем влияние способа обработки последовательности слов текста – слева направо и справа налево.

Для проведения экспериментов будем использовать две популярные модели формирования расширенных векторных представлений слов GloVe и FastText, по сути, скрытых векторных пространств слов.

Из моделей GloVe [5] возьмем предварительно обученные векторные представления слов из 300-мерного пространства glove840B.300d, включающего более 2 миллионов слов, а также из 100-мерного пространства glove.6B.100d.txt с 400 тысячами слов.

Из модели FastText [6] воспользуемся предварительно обученными векторными представлениями из пространства wiki-news-300d-1M.vec, в размере одного миллиона векторных представлений слов, обученных на Википедии.

В качестве объектов классификации возьмем два датасета.

Первый набор текстовых данных NewsGroups из библиотеки sklearn. Этот набор содержит около 18000 сообщений в группах новостей по 20 темам, разделенных на два подмножества: одно для обучения, а другое для тестирования. Для проведения экспериментов весь набор разобьем на 5 групп по категориям: *sci*, *comp*, *rec*, *talk* и *mix*. В каждой из этих категорий включено по 4 класса новостей.

В качестве второго датасета используем набор данных WELFake, который служит для обнаружения фейковых новостей. Он содержит 72134 статьи, из которых 35 028 являются реальными, а 37 106 – фейковыми.

В настоящем исследовании не ставилась цель изучения влияния архитектуры классификатора на точность результата классификации. Поэтому использовались только две достаточно простые модели.

Для классификации текстов с использованием простейших методов агрегации будем использовать трехслойную модель персептрона `functional_1`, а для обработки глобальных эмбеддингов, сохраняющих семантическую информацию – модель `functional_2` (рис. 1). На рис. 1 приведены данные о числе параметров нейронных сетей для случая использования эмбеддингов размерности 300 и 100, они разделены косой чертой.

Model: "functional_1"			Model: "functional_2"		
Layer (type)	Output Shape	Param #	Layer (type)	Output Shape	Param #
embedding (Embedding)	(1, 50, 300/100)	15,075,600/8,184,500	input_layer_3 (InputLayer)	(None, 50)	0
flatten (Flatten)	(1, 15000/5000)	0	embedding_3 (Embedding)	(None, 50, 300/100)	15,075,600/8,184,500
dense (Dense)	(1, 128)	1,920,128/640,128	lstm (LSTM)	(None, 50, 256)	570,368
dense_1 (Dense)	(1, 64)	8,256	dropout (Dropout)	(None, 50, 256)	0
dense_2 (Dense)	(1, 4)	260	lstm_1 (LSTM)	(None, 64)	82,176
Total params: 17,004,244/8,633,144 (64.87/33,70 MB)			dense_9 (Dense)	(None, 64)	4,160
Trainable params: 1,928,644/648,644 (7.36/2,47 MB)			dropout_1 (Dropout)	(None, 64)	0
Non-trainable params: 15,075,600/8,184,500 (57.51/31,22 MB)			dense_10 (Dense)	(None, 4)	260
			Total params: 15,732,564/8,636,664 (60.01/32,95 MB)		
			Trainable params: 656,964/452,164 (2.51/1,72 MB)		
			Non-trainable params: 15,075,600/8,184,500 (57.51/31,22 MB)		

Рис. 1. Модели нейронных сетей для классификации тестов

Можно заметить, что обе модели используют в качестве входных данных идентичные предобученные эмбеддинги.

Первый эксперимент проводился над пятью категориями *sci*, *comp*, *rec*, *talk* и *mix* набора текстовых данных NewsGroups. В каждой из них тексты классифицировались по четырем классам. Для представления слов документов использовались представленные выше 100- и 300-размерные эмбеддинги GloVe. Использовались три метода агрегации эмбеддингов: метод суммирования эмбеддингов (*Sum*), метод нахождения среднего (*Mean*) и конкатенация эмбеддингов (*Concat*). Для получения глобальных эмбеддингов текстов, сохраняющих семантическую информацию, использовалась LSTM модель `functional_2` (рис. 1). Один глобальный эмбеддинг формировался моделью при подаче на ее входы текста в прямом направлении (LSTM256), а второй – при подаче текста в обратном направлении (LSTM256_r), то есть «задом-наперед», назовем его реверсивным эмбеддингом. Следует подчеркнуть, что в целях стандартизации процедуры предобработки данных все исходные тексты были ограничены по длине 50 словами. Тексты, которые были короче дополнялись «пустыми» словами, а более длинные тексты обрезались.

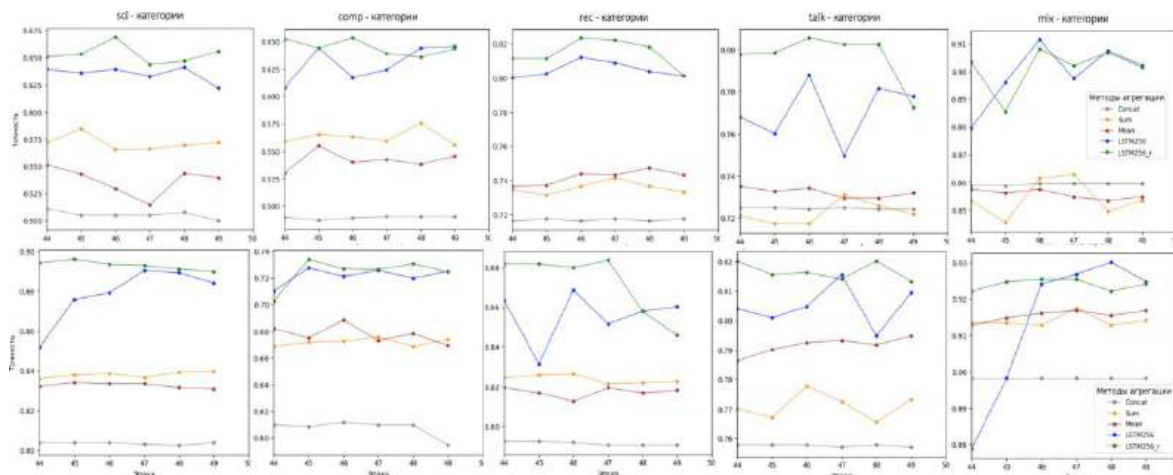


Рис. 2. Точность классификации: первый ряд на основе эмбедингов glove.6B.100d.txt, второй ряд – glove840B.300d

На рис. 2 в первом ряду представлены результаты классификации на основе 100-размерных эмбедингов glove.6B.100d.txt, а во втором ряду – на основе 300-размерных эмбедингов glove840B.300d. На графиках приведены оценки точности валидации на последних пяти эпохах.

Анализ графиков позволяет установить первую общую закономерность, заключающуюся в том, что наибольшая точность классификации практически во всех категориях и разных размерностях эмбедингов получалась при использовании реверсивного эмбединга LSTM256_r. При этом все другие методы агрегации с точки зрения точности распределились в неизменном порядке: LSTM256_r, LSTM256, Mean, Sum и Concat.

Вторая, достаточно очевидная, наблюдаемая закономерность состоит в том, что точность классификации выше при использовании эмбедингов glove840B.300d большей размерности (рис. 2).

Интересно было сравнить влияние эмбедингов одинаковой размерности, полученных от разных моделей, на точность классификации. Для этой цели были использованы эмбединги из пространства wiki-news-300d-1M.vec в сравнении с пространством glove840B.300d. На рис. 3 приведены результаты для категории sci (для других категорий текстов сохраняется аналогичная тенденция).

Анализ результатов показывает некоторое преимущество glove840B.300d. Возможно это объясняется тем, что GloVe подходит для разнообразных наборов данных и когда важно уловить глобальный контекст.

Анализ результатов рис. 3 показал, что точность классификации в разных категориях текстов различается. Возможно это объясняется рядом при-

чин: сбалансированностью классов, ошибками в метках классов, субъективностью и малым количеством признаков, отличающих классы.

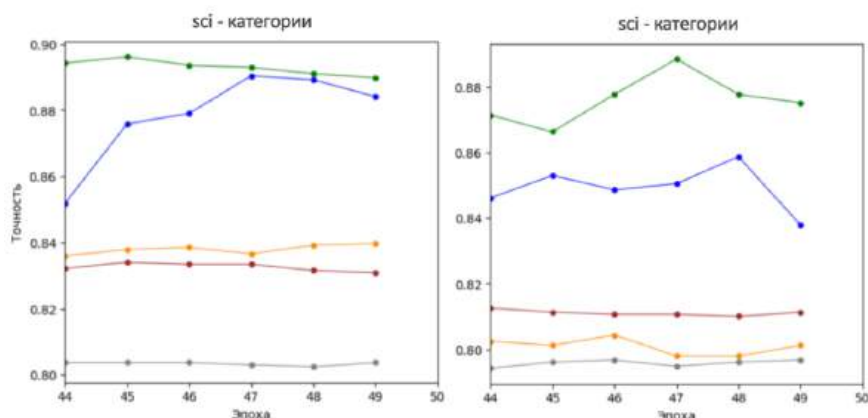


Рис. 3. Точность классификации при использовании эмбедингов из glove840B.300d слева и wiki-news-300d-1M.vectors справа

Следующим шагом в исследовании являлось сравнение точности множественной и бинарной классификации. Для этой цели использовались текстовые данные NewsGroups с двадцатью классами без разделения на категории и текстовые данные WELFake с двумя классами. При этом, сначала были использованы эмбединги из пространства glove.6B.100d.txt. Результаты этого исследования приведены на рис. 4. Можно видеть, что точность классификации данных NewsGroups при участии 20 классов не превысила максимальной точности отдельных категорий sci и comp (смотри рис. 2 первый ряд) и этот результат вполне очевиден. С другой стороны, классификация с двумя классами показала достаточно высокую точность.

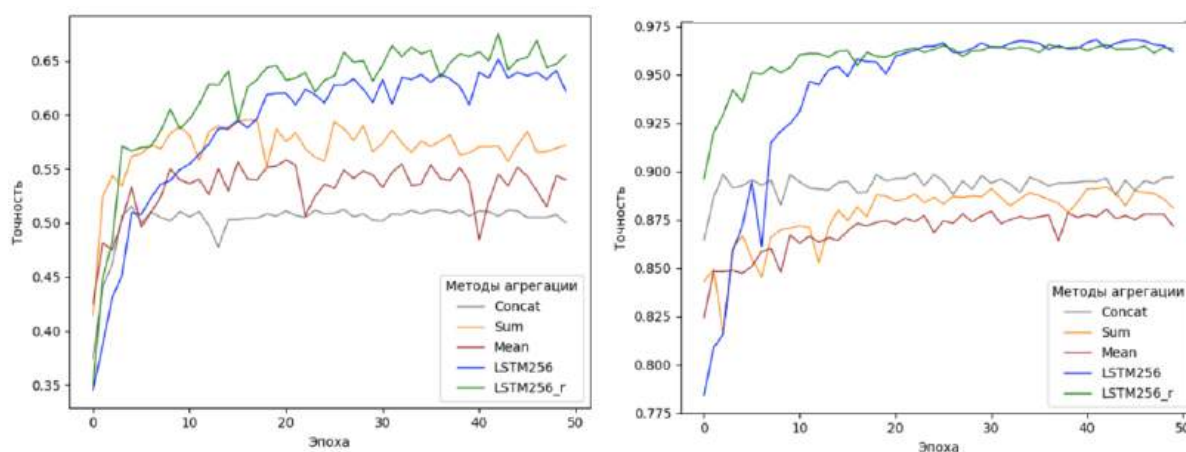


Рис. 4. Точность классификации данных NewsGroups слева и WELFake справа с использованием пространства векторов glove.6B.100d.txt

Интересно продолжить последний эксперимент задавшись вопросом, как можно повысить точность в обоих случаях. Очевидно, логично взять эмбединги из пространства glove840B.300d, использовать реверсивный эмбединг LSTM256_r и расширить ограничение исходных текстов по длине (расширено вдвое).

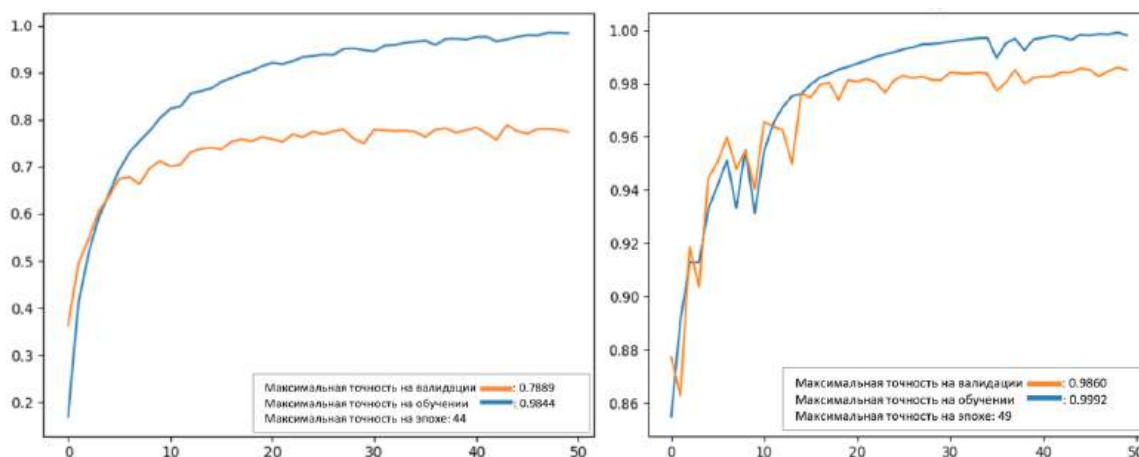


Рис. 5. Точность классификации данных NewsGroups слева и WELFake справа с использованием пространства векторов glove840B.300d

Результат представлен на рис. 5, откуда видно увеличение точности в обоих случаях. При этом для данных WELFake получена отличная точность при валидации, тогда как для данных NewsGroups она хотя и увеличилась, но ограничена в силу отмеченных выше обстоятельств.

Полученные в работе результаты продемонстрировали эффективность использования глобальных эмбедингов текстов, которые сохраняют семантическую информацию. Точность классификации зависит от выбора скрытого пространства векторов. Увеличения точности классификации текстовых документов можно добиться, используя рекурсивные эмбединги из пространств высокой размерности. На результат также оказывает влияние минимизация ограничения исходных текстов по длине.

Точность классификации зависит еще от многих факторов, которые не рассматривались в настоящей работе. Это нюансы предобработки текста, выбор классификатора и гиперпараметров его обучения, размер обучающей выборки и сбалансированность классов.

Список используемых источников

1, Litvinov V. L. Research of neural network methods of text information classification. В сборнике: Proceedings of 2019 3rd International Conference on Control in Technical Systems, CTS 2019. 2019. PP. 225-227.

2. Мансур А. М. Алгоритм на основе трансформеров для классификации длинных текстов. Известия ЮФУ. Технические науки. 2024. № 3 (239). С. 187-196.
3. Серова В. С., Голлай А. В., Бунова Е. В. Гибридный метод классификации текстовых данных с узкоспециализированной терминологией. Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2025. Т. 25, № 3. С. 42-52. DOI: 10.14529/ctcr250304.
4. Плешакова Е. С., Гатауллин С. Т., Осипов А. В. и др. Эффективная классификация текстов на естественном языке и определение тональности речи с использованием выбранных методов машинного обучения. Вопросы безопасности. 2022. № 4. С. 1-14. DOI: 10.25136/24097543.2022.4.38658.
5. Pennington J., Socher R., Manning C.D. GloVe: Global Vectors for Word Representation. EMNLP 2014. 2014. PP. 1532-1543. DOI: 10.3115/v1/D14-1162.
6. English word vectors. URL: <https://fasttext.cc/docs/en/english-vectors.html>. (дата обращения: 30.05.2026).
7. Mikolov T., Chen K., Corrado G., Dean J. Efficient Estimation of Word Representations in Vector Space. arXiv preprint. 2013. DOI: 10.48550/arXiv.1301.3781.
8. Sutskever I., Vinyals O., Le Q.V. Sequence to Sequence Learning with Neural Networks. URL: <https://arxiv.org/pdf/1409.3215>. (дата обращения: 30.05.2026).

EMBEDDING AGGREGATION METHODS TO SOLVE TEXT CLASSIFICATION PROBLEMS

Gubin A., Litvinov V., Filippov F.

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

The use of neural networks to solve text classification problems can significantly increase accuracy compared to traditional machine learning methods. These approaches are based on the use of embeddings. To classify a text, it is necessary to aggregate the embeddings of individual words into a single vector. The article discusses various methods of embedding aggregation and their impact on classification accuracy.

Key words: *natural language processing, embeddings, text classification, LSTM*

УДК 004.932

ГРНТИ 28.23.37

КОМПОЗИТНЫЙ ИНДЕКС СОСУДИСТОЙ ЖЕСТКОСТИ НА ОСНОВЕ БИМЕДИЦИНСКИХ СИГНАЛОВ

В. В. Давыдов, Д. А. Прохоров, М. А. Якушева

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В данной работе представлен метод оценки старения сердечно-сосудистой системы на основе анализа биомедицинских сигналов. Используется компьютерное моделирование сигналов, позволяющее получать пульсовые волны с известными параметрами сосудистой жесткости. Проведена оценка индексов по точности, устойчивости к шуму и чувствительности к внешним факторам. В качестве решения зависимости индексов от физиологического фона предложен алгоритм формирования композитного индекса. Результаты демонстрируют, что использование данных артериального давления и фотоплетизмограммы позволяет достичь корреляции с эталоном $R > 0.96$ даже при низком отношении сигнал/шум.

пульсовая волна, алгоритм, диагностика, сердечно-сосудистые заболевания, анализ физиологических сигналов

В последние годы задачи неинвазивной диагностики сердечно-сосудистой системы все чаще решаются с использованием методов цифровой обработки сигналов [1]. Одним из ключевых направлений является оценка сосудистой жесткости [2], отражающей возрастные и патологические изменения артериальной стенки. Существующие методы основаны на анализе формы пульсовой волны и фотоплетизмограммы [3, 4], однако их практическое применение ограничено из-за чувствительности к шумам и артефактам. Это приводит к снижению точности оценки и затрудняет использование таких индексов в качестве эталонных. В работе предлагается рассмотреть задачу оценки старения сердечно-сосудистой системы как задачу анализа сигналов, извлечения признаков и валидации алгоритмов в вычислительной среде.

Вычисление производится на одномерной модели гемодинамики, описывающей распространение пульсовых волн в артериальной системе. На рисунке 1 представлена одномерная модель артериальной системы, в которой сосуды рассматриваются как упругие трубки, соединенные в разветвленную сеть.

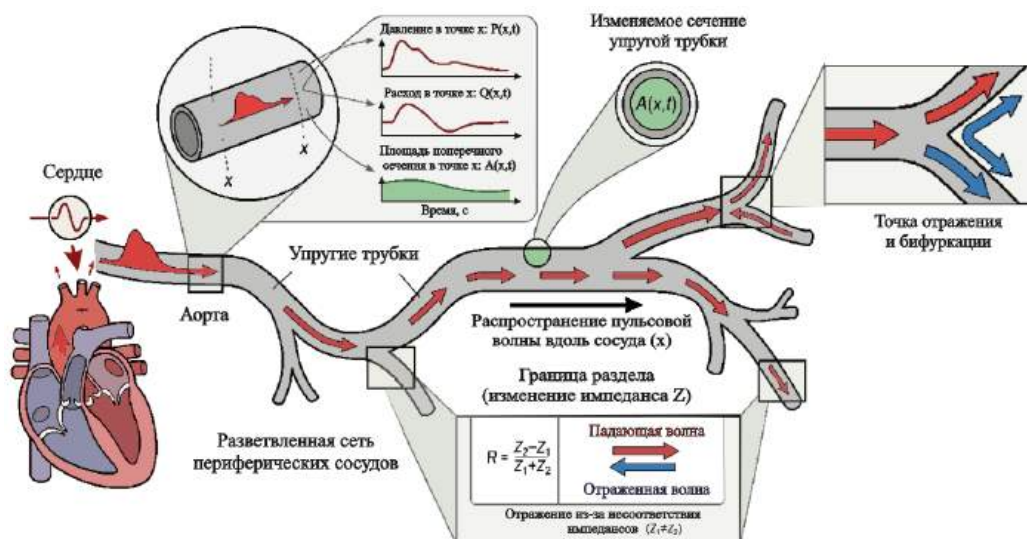


Рис. 1. Схема 1D модели артериальной системы

Пульсовая волна генерируется сердцем и распространяется вдоль аорты и периферических сосудов. Состояние системы задается площадью сечения сосуда, объемным расходом и давлением. На границах сосудов возникают учетные отраженные волны, вызванные изменением импеданса.

Программа для обработки сигналов выполнена в среде MATLAB и построена по принципу последовательной обработки данных, поэтому каждый этап реализован независимо, что позволяет при необходимости изменять отдельные компоненты без переработки всей системы (рис. 2).

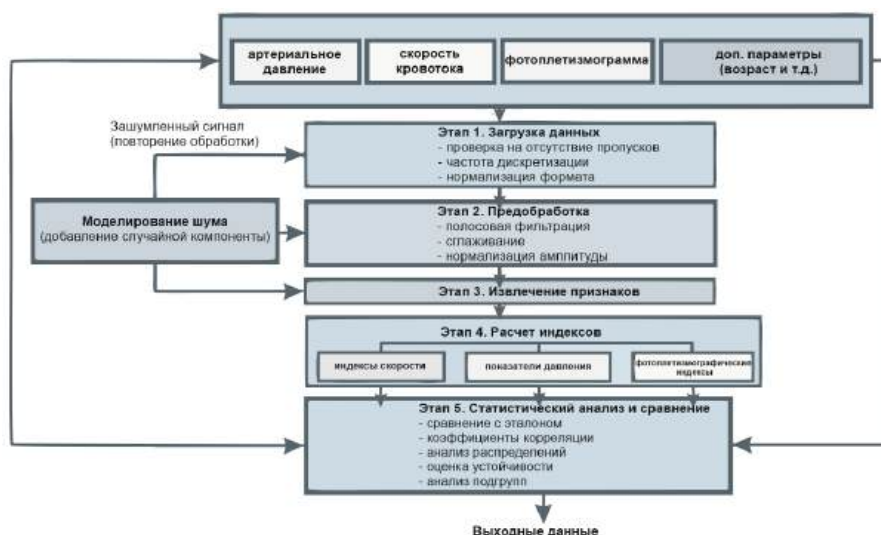


Рис. 2. Блок-схема алгоритма обработки сигналов

При моделировании на вход системы поступают сигналы артериального давления $P(t)$, скорости кровотока $U(t)$ и фотоплетизмограммы $PPG(t)$ (1):

$$X = \{P(t), U(t), PPG(t)\} \quad (1)$$

Далее идет этап предобработки, который включает полосовую фильтрацию, сглаживание и нормализацию, что позволяет снизить влияние шумов [5] и обеспечить сопоставимость сигналов (2):

$$x_{pre}(t) = F_{norm} \left(F_{filter}(x(t)) \right) \quad (2)$$

Так как в форме пульсовой волны присутствуют характерные точки (рис. 3): основание волны, соответствующее началу сердечного цикла, систолический пик, отражающий максимальное давление, точка перегиба, связанная с приходом отраженной волны, а также диастолическая выемка, соответствующая закрытию аортального клапана, то следующим этапом является анализ формы сигнала и его производных.

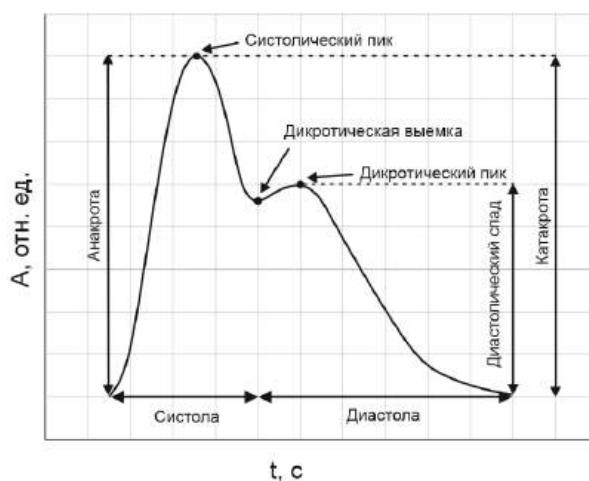


Рис. 3. Пример пульсовой волны с характерными точками

Выделенные характерные точки позволяют рассчитать комплекс временных и амплитудных параметров (3):

$$I = \Psi(F) \quad (3)$$

Среди них ключевое значение имеют два маркера: скорость распространения пульсовой волны V_{pw} (4) и сердечно-лодыжечный сосудистый индекс CAVI (5) [6]:

$$V_{pw} = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (4)$$

$$CAVI = a * \ln \left(\frac{S_{bp}}{D_{bp}} \right) * V_{pw}^2 + b \quad (5)$$

где Δx – расстояние между точками, Δt – задержка между фронтами волн, S_{bp} – систолическое давление, D_{bp} диастолическое давление, a и b – эмпирические коэффициенты.

Следующим шагом проводится статистический анализ. Полученные метрики сопоставлялись с эталонным критерием жесткости, то есть модулем Юнга E_{Ao} (6):

$$E_{Ao} = \sum_{i=1}^n \frac{L_i}{L_{Ao}} E_i \quad (6)$$

где E_i – модуль для сегмента, L_i – длина сегмента.

Величину E_{Ao} можно рассматривать для оценки качества индексов. Степень взаимосвязи рассчитывается на основе коэффициентов корреляции Пирсона и Спирмена. Чтобы проверить методы на устойчивость, были смоделированы помехи. К исходным сигналам подмешивалась случайная компонента, после чего данные пересчитывались.

Наиболее надежным инструментом для диагностики жесткости оказались маркеры, базирующиеся на времени прохождения пульсовой волны (к примеру, скорость распространения пульсовой волны V_{pw}). В этой группе коэффициенты Пирсона преодолели отметку $r_p > 0,95$. Достойную информативность показал также индекс CAVI, однако фотоплетизмограмма наглядно продемонстрировала свою зависимость от шумов. Если уровень SNR опускается ниже 20 дБ, математический аппарат начинает давать серьезные сбои. Дополнительным дестабилизирующим фактором выступает зависимость индексов от ЧСС и ударного объема, порождающая предсказуемую систематическую погрешность.

Обнаруженные ограничения подтверждают, что традиционный анализ одномерных параметров [7] исчерпал свои возможности. В качестве решения в работе предлагается перейти к композитному индексу сосудистой жесткости. Суть предлагаемого подхода в том, что каждый частный показатель рассматривается как неполная оценка.

Итоговый композитный индекс определяется через взвешенную сумму нормированных параметров (7):

$$I_{fusion} = \sum_{i=1}^n w_i * \tilde{I}_i \quad (7)$$

где величина $\tilde{I}_i$ представляет собой уже нормализованные значения исходных индексов, тогда как коэффициенты w_i задают их удельный вес в финальной оценке. Нормализация необходима, чтобы масштабировать разнородные показатели и сделать их сопоставимыми (8):

$$\tilde{I}_i = \frac{I_i - \mu_i}{\sigma_i} \quad (8)$$

где μ_i и σ_i – среднее значение и стандартное отклонение соответствующего индекса в выборке.

Центральное место в предложенном подходе занимает вычисление весовых коэффициентов. В основу расчета легли два критерия: информативность конкретного признака и его защищенность от помех. Степень информативности оценивается через коэффициент корреляции с базовым маркером жесткости сосудов. Помехоустойчивость же проверяется экспериментально в зависимости от того, насколько сильно меняются значения при искусственном наложении шума. Математическое выражение для этого расчета выглядит следующим образом (9):

$$w_i = \frac{|r_i|}{\sum_{j=1}^n |r_j|} \quad (9)$$

где r_i понимается коэффициент корреляции, связывающий конкретный индекс I_i с модулем Юнга аорты. Чтобы минимизировать погрешности, в модель вводится дополнительная поправка на шумовое загрязнение (10):

$$w_i = \frac{r_i}{\sigma_{noise,i}} \quad (10)$$

где $\sigma_{noise,i}$ характеризует изменение индекса при ухудшении отношения сигнал/шум.

Метод опирается на концепцию интеграции разнородных признаков в ЦОС. Суть метода в объединении нескольких независимых параметров, оценивающих состояние сосудистого русла. Очевидно, что каждый индекс в отдельности содержит случайную составляющую ошибки, однако их совместное использование нивелирует случайные отклонения. В биомедицине, где сигналы традиционно зашумлены из-за движения пациента и внешних помех, такой подход кардинально повышает надежность расчетов. Стабилизация оценки артериальной жесткости за счет агрегации параметров открывает новые возможности к внедрению алгоритма в носимую электронику и программные комплексы поддержки принятия врачебных решений.

Список используемых источников

1. O'Rourke M. F. Nichols W. W. McDonald's Blood Flow in Arteries: Theoretical, Experimental and Clinical Principles. 6th ed. London: Hodder Arnold, 2011. 608 p. ISBN 978-0-340-98603-5.
2. Laurent S., Cockcroft J., Van Bortel L., Boutouyrie P., Giannattasio C., Hayoz D., Pannier B., Vlachopoulos C., Wilkinson I., Struijker-Boudier H. Expert consensus document on arterial stiffness: methodological issues and clinical applications // European Heart Journal. 2006. Vol. 27. N 21. P. 2588–2605. DOI: 10.1093/eurheartj/ehl254.
3. Allen J. Photoplethysmography and its application in clinical physiological measurement // Physiological Measurement. 2007. Vol. 28. N 3. PP. R1–R39. DOI: 10.1088/0967-3334/28/3/R01.
4. Mukkamala R., Hahn J.-O., Inan O. T., Mestha L. K., Kim C.-S., Töreyn H., Kyal S. Toward Ubiquitous Blood Pressure Monitoring via Pulse Transit Time: Theory and Practice // IEEE Transactions on Biomedical Engineering. 2015. Vol. 62. N 8. PP. 1879–1901. DOI: 10.1109/TBME.2015.2441951.
5. Kim K. B., Baek H. J. Photoplethysmography in Wearable Devices: A Comprehensive Review of Technological Advances, Current Challenges, and Future Directions // Electronics. 2023. Vol. 12. N 13. Art. 2923. DOI: 10.3390/electronics12132923.
6. Shirai K, Hiruta N, Song M, Kurosu T, Suzuki J, Tomaru T, Miyashita Y, Saiki A, Takahashi M, Suzuki K, Takata M. Cardio-ankle vascular index (CAVI) as a novel indicator of arterial stiffness: theory, evidence and perspectives. J Atheroscler Thromb. 2011;18(11):924-38. DOI: 10.5551/jat.7716.
7. Kondiboyina A., Harrington H. A., Smolich J. J., Mynard J. P., Alastruey J. Optimized Design of an Arterial Network Model Reproduces Characteristic Central and Peripheral Haemodynamic Waveform Features in Young Adults // The Journal of Physiology. 2022. Vol. 600. N 17. PP. 3725–3747. DOI: 10.1113/JP282942.

A COMPOSITE VASCULAR STIFFNESS INDEX BASED ON BIOMEDICAL SIGNALS**Davydov V., Prokhorov D., Yakusheva M.**

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

This paper presents a method for assessing cardiovascular aging based on biomedical signal analysis. Computer signal modeling is used to obtain pulse waves with known vascular stiffness parameters. The indices are assessed for accuracy. Noise immunity, and sensitivity to external factors. An algorithm for generating a composite index is proposed to address the dependence of the indices on physiological background. The results demonstrate that using blood pressure and photoplethysmogram data allows for a correlation with the reference standard of $R > 0.96$, even with a low signal-to-noise ratio.

Key words: pulse wave, algorithm, diagnostics, cardiovascular diseases, analysis of physiological signals

УДК 004.056

ГРНТИ 49.33.29

ПРОБЛЕМЫ ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛЕЙ НАРУШИТЕЛЯ И УГРОЗ ОБЛАЧНЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Е. В. Давыдова¹, Н. Н. Мошак²

¹Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича,

²Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Неуклонный рост и расширение облачных систем неизбежно сопровождается усилением угроз информационной безопасности на конфиденциальность, целостность и доступность их ценнейших ресурсов, что требует разработки новых подходов к обеспечению безопасности в облачной среде. Предложен обзор основных типов и моделей обслуживания «облачных» сервисов, разработанных Национальным институтом стандартов и технологий США. Рассмотрены две основные технологии по созданию систем облачных вычислений, основанные на виртуализации серверов: на основе гипервизора и изолированных контейнеров. Приводятся основные риски и проблемы безопасности моделей, предоставляемых облачным провайдером услуг. Обсуждаются проблемы построения моделей нарушителя и угроз облачной среды на примере частного облака.

безопасность облачных вычислений, Saas, PaaS, IaaS, private cloud, public cloud, hybrid cloud, community cloud, модели нарушителя и угроз

В современном мире облачные вычисления играют критически важную роль в оперативном функционировании бизнеса, государственных учреждений и частной жизни людей [1]. Однако, неуклонный рост и расширение облачных систем неизбежно сопровождается усилением угроз информационной безопасности. Эти угрозы направлены на конфиденциальность, целостность и доступность ценнейших активов – данных. Интенсификация кибератак на информационные ресурсы и сервисы требует построения и анализа модели угроз и нарушителя, разработки новых подходов к обеспечению безопасности в облачной среде, что определяет актуальность и значимость предложенного исследования в данной области.

Классификация основных типов и моделей обслуживания «облачных» сервисов разработана Национальным институтом стандартов и технологий США (NIST). Наиболее распространенными являются три следующие модели «облачных» сервисов:

1. Программное обеспечение как услуга (Software-as-a-Service, Saas);

2. Платформа как услуга (Platform-as-a-Service, PaaS);
3. Инфраструктура как услуга (Infrastructure-as-a-Service, IaaS).

Выделяют четыре модели развертывания «облачных» сервисов по отношению к кругу пользователей.

Частное облако (private cloud) – это модель облачных вычислений, где вычислительные ресурсы предоставляются эксклюзивно одной организации и физически находятся на территории этой организации или у стороннего провайдера. Ключевые особенности частных облаков в структуре обеспечения информационной безопасности:

- ответственность клиента за инфраструктуру;
- возможность детальной настройки управления безопасностью;
- хорошая видимость внутридневных операций;
- легкий доступ к системным логам и политикам;
- приложения и данные остаются внутри сетевого экрана.

Публичное облако (public cloud) – услуга облачных вычислений, предоставляемая через Интернет сторонним поставщиком, включающая разнообразные ресурсы, такие как серверы, хранилища, базы данных и приложения, размещенные на удаленных серверах и доступные посредством модели «оплата по факту использования». Можно отметить следующие особенности безопасности публичных облаков:

- за инфраструктуру отвечает провайдер;
- меньшая настраиваемость управления безопасностью;
- нет видимости внутридневных операций;
- трудный доступ к логам и политикам;
- приложения и данные используются публично.

Гибридное облако (hybrid cloud) – это комбинация частного облака, принадлежащего организации, и публичного облака, предоставляемого внешним провайдером. Гибридные облака несут в себе те же риски, как частные и публичные облака в случаях неправильного их использования.

Общественное облако (community cloud) – это модель облачного сервиса, предназначенная для использования не одной, а группой организаций, объединенных общими интересами и требованиями, такими как схожие миссии, политики безопасности, стандарты или вопросы соответствия регулятивным нормам.

В модель нарушителя в облачной информационной системе строится по аналогии с типовой информационной системой и ее структурой [2], где особое внимание также должно уделяться легальному привилегированному

пользователю. Рассмотрим особенность построения моделей нарушителя и угроз на примере частного облака. Частное облако характеризуется динамичностью ресурсов, высокой степенью виртуализации и размытостью внутренних границ доверия. Как объект защиты, частное облако обладает следующими специфическими свойствами:

1. Абстракция ресурсов;
2. Физическое оборудование скрыто от пользователя слоем виртуализации, что требует реализации мер защиты на уровне гипервизора и систем оркестрации;
3. Высокая концентрация данных. Консолидация вычислительных мощностей в едином пуле повышает ценность ресурса для злоумышленника и увеличивает потенциальный ущерб от компрометации.
4. Автоматизация управления. Использование программных интерфейсов (API) для управления инфраструктурой создает новые векторы атак, направленные на плоскость управления (Control Plane).

Специфика частного облака, где периметр контролируется организацией, но доступ к ресурсам осуществляется удаленно, определяет необходимость выделения двух основных категорий нарушителей: внешних и внутренних.

1. Внешние нарушители (External Threat Actors)

Лица или группы лиц, не имеющие легитимных прав доступа к информационным системам облака и находящиеся за пределами контролируемой зоны (КЗ).

Потенциал: варьируется от низкого (использование общедоступных эксплойтов) до высокого (разработка 0-day уязвимостей, целевые АРТатаки).

Векторы атак: Эксплуатация уязвимостей веб-интерфейсов и API, фишинг для компрометации учетных данных, атаки на цепочку поставок (Supply Chain Attacks) через внедрение закладок в образы контейнеров или обновления ПО [3];

2. Внутренние нарушители (Internal Threat Actors / Insiders)

Лица, имеющие легитимный доступ к компонентам облачной инфраструктуры (пользователи, администраторы, подрядчики). В контексте частного облака данная категория представляет наивысший риск из-за наличия прав и знания архитектуры.

Потенциал: высокий, так как нарушитель уже находится внутри периметра защиты и может использовать штатные инструменты администрирования (Living-off-the-Land Binaries) для развития атаки.

Векторы атак: Превышение должностных полномочий, копирование данных на неучтенные носители, отключение средств аудита, внесение не-санкционированных изменений в конфигурацию гипервизора или сетевого оборудования.

Анализ инцидентов последних лет (TeamTNT, Kinsing) и отчетов по безопасности (Varonis, Unit 42) позволяет выделить наиболее критичные сценарии реализации угроз нарушителями в виртуализированной среде [4, 5]:

- побег из виртуальной машины (VM Escape);
- компрометация плоскости управления (Management Plane Compromise);
- атаки на цепочку поставок образов (Image Poisoning); злоупотребление привилегиями (Privilege Escalation).

Разработка модели угроз (Threat Modeling) является ключевым этапом анализа защищенности, позволяющим идентифицировать актуальные сценарии атак и определить приоритеты при выборе средств защиты. Для частного облака, функционирующего в правовом поле РФ, базовым документом для моделирования выступает «Банк данных угроз безопасности информации» ФСТЭК России и методика оценки угроз 2021 года. В качестве дополнительного инструментария для декомпозиции архитектурных рисков целесообразно использовать международную методологию STRIDE (Spoofing, Tampering, Repudiation, Information Disclosure, Denial of Service, Elevation of Privilege) [6].

Классические угрозы информационной безопасности в публичном облаке становятся особенно актуальными. Внутренние угрозы не являются какими-то новыми типами угроз, но при переходе корпоративных дата-центров в виртуальные, традиционные механизмы контроля доступа становятся менее эффективными, не будучи приспособленными к виртуальному пространству. Из-за технологических особенностей, используемых для построения структуры облачных вычислений, к стандартным типам угроз [7] прибавились сложности, связанные с защитой облачной среды виртуализации, трафика между гостевыми машинами и разграничением прав доступа, а также распределенной и открытой структуры облачных вычислений с мультидоменной и многопользовательской структурой, а также наличием некон-

тролируемой системами безопасности слепой зоны – трафика между виртуальными серверами в облаке.

Таким образом, на основе анализа объекта защиты и модели нарушителя, а также с учетом статистики инцидентов за 2023–2024 гг. [4,5, 8], выделяется следующий перечень типовых актуальных угроз для частного облака:

1. Угрозы уровню виртуализации. Наиболее специфичный класс угроз, направленный на компрометацию гипервизора как доверенной базы: выход за пределы виртуальной машины (VM Escape) – эксплуатация уязвимостей в коде гипервизора (например, в модуле эмуляции устройств ввода-вывода QEMU/KVM) позволяет злоумышленнику получить доступ к хостовой ОС из гостевой среды; атаки по побочным каналам (Cross-VM Side Channel Attacks) – извлечение криптографических ключей или конфиденциальных данных из кэша процессора (L3 Cache) соседней виртуальной машины;

2. Угрозы уровню управления (Control Plane). Атаки на интерфейсы оркестрации (API) и консоли администраторов: компрометация API управления – использование уязвимостей в вебинтерфейсах (OpenStack Horizon, vCenter) или перехват сессионных токенов. Согласно отчету Trend Micro, 66 % инцидентов в облаках связаны именно с ошибками конфигурации API [8]; Злоупотребление привилегиями (Insider Threat): неправомерные действия легитимных администраторов (удаление бэкапов, копирование баз данных);

3. Угрозы данным и приложениям. Утечка данных через общие ресурсы: остаточная информация на виртуальных дисках или в оперативной памяти, которая не была корректно очищена перед выделением ресурса другому пользователю; внедрение вредоносного ПО в образы (Image Poisoning) – модификация базовых образов ОС в репозитории облака. Вредоносный код активируется автоматически при развертывании новых инстансов.

Анализ статистики инцидентов показывает смещение вектора атак от технологического взлома к эксплуатации ошибок человека и конфигурации. По данным Positive Technologies (2024), в 74 % успешных атак на облачные инфраструктуры точкой входа служил фишинг, а в 65 % случаев критические последствия наступали из-за некорректной настройки прав доступа (IAM) [5].

Таким образом, модель угроз частного облака носит динамический характер и требует регулярного пересмотра (Threat Intelligence) с учетом по-

явления новых классов уязвимостей в платформах виртуализации и контейнеризации.

Список используемых источников

1. Patel A. An Intrusion Detection and Prevention System in Cloud Computing: A Systematic Review / A. Patel, M. Taghavi, K. Bakhtiyari [et al.] // Journal of Network and Computer Applications. 2013. Vol. 36, iss. 1. PP. 25–41.
2. Мошак Н. Н. Безопасность информационных систем: учеб. -метод. пособие / Н. Н. Мошак СПб.: ГУАП, 2020. 73 с.
3. Акбарова М. Р. Безопасность и защита данных в облачных технологиях // Universum: технические науки: электрон. научн. журн. 2022. 10 (103). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/14427> (дата обращения: 19.07.2026).
4. Cloud Threat Report, Volume 7 // Unit 42, Palo Alto Networks. 2023. URL: paloaltonetworks.com (дата обращения: 20.07.2026).
5. Актуальные киберугрозы: итоги 2024 года // Positive Technologies. 2025.
6. Shostack A. Threat Modeling: Designing for Security. Indianapolis: Wiley, 2014. 624 p.
7. Мошак Н. Н., Евсейко К. В., Логинцев А. В. Проблемы защиты информационно-телекоммуникационной инфраструктуры РФ от кибератак // Региональная информатика и информационная безопасность. Сборник трудов. Выпуск 3 / СПОИСУ. СПб., 2017. С. 31-36.
8. Trend Micro 2023 Cloud Security Report. URL: <https://resources.trendmicro.com/rs/945-CXD-062/images/2023-Cloud-Security-Report-TrendMicro-Final.pdf> (дата обращения: 19.07.2026).

PROBLEMS OF CONSTRUCTING MODELS OF INVADERS AND THREATS TO CLOUD INFORMATION SYSTEMS

Davydova E¹, Moshak N.²

¹The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

²Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

The continued growth and expansion of cloud systems inevitably comes with increasing information security threats to the confidentiality, integrity, and availability of their valuable resources, requiring the development of new approaches to ensuring security in the cloud environment. This article provides an overview of the main types and service models for cloud services developed by the National Institute of Standards and Technology (NIST). It examines two key technologies for creating cloud computing systems based on server virtualization: hypervisor-based and isolated containers. The key risks and security issues associated with cloud service provider models are outlined. The challenges of constructing attacker and threat models for cloud environments are discussed using a private cloud as an example.

Key words: cloud computing security, SaaS, PaaS, IaaS, private cloud, public cloud, hybrid cloud, community cloud, attacker and threat models

УДК 004.622

ГРНТИ 76.29.30

РАЗРАБОТКА И ОЦЕНКА МЕТОДОВ АППРОКСИМАЦИИ ОГИБАЮЩЕЙ СПЕКТРА В ЗАДАЧАХ ОБРАБОТКИ ЭЛЕКТРОКАРДИОСИГНАЛОВ СВЕРХВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

Е. А. Денисова

Институт аналитического приборостроения Российской академии наук

Метод электрокардиографии сверхвысокого разрешения (ЭКГ СВР) позволяет выявлять ранние признаки ишемии миокарда, однако обработка высокочастотных электрокардиосигналов затруднена из-за шумов и неоднозначности интерпретации спектральных данных. Применение аппроксимации огибающей спектра упрощает анализ, сохраняя диагностически значимую информацию. В работе проведена разработка и сравнительная оценка двух методов аппроксимации: полиномиальной функцией и набором нормальных распределений. Показано, что метод на основе нормальных распределений обеспечивает более высокое качество аппроксимации по критериям AIC, MSE и R^2 , что подтверждает его перспективность для ранней диагностики ишемических изменений.

электрокардиография сверхвысокого разрешения, аппроксимация, полиномиальная функция, набор нормальных распределений

В настоящее время стандартные методы электрокардиографии (ЭКГ) не позволяют надежно выявлять маркеры ишемической болезни сердца на ранних стадиях ее развития [1]. Метод ЭКГ сверхвысокого разрешения (ЭКГ СВР), разрабатываемый в лаборатории 235 «Радио- и оптоэлектронных приборов ранней диагностики заболеваний человека» Института аналитического приборостроения Российской академии наук, направлен на фиксацию патологических изменений не только в классических областях обработки электрокардиосигналов (ЭКС), но и в зонах, традиционно считающихся помехами [2].

Апробация метода ЭКГ СВР проводится при экспериментальных исследованиях по моделированию искусственно-вызванной сердечной непроходимости у подопытных животных в структурном подразделении Национального медицинского исследовательского центра имени В. А. Алмазова – Институте экспериментальной медицины. Результатом данных экспериментов являются записи ЭКС СВР, которые можно разделить на этапы «стабилизация», «ишемия» и «реперфузия». Регистрация сигнала происходит в двух каналах: низкочастотном (НЧ), являющимся аналогом стандартной ЭКГ, и высокочастотном (ВЧ), содержащим микропотенциалы.

Согласно гипотезе, данные, полученные с ВЧ канала регистрации ЭКГ СВР, содержат маркеры ишемии на ранней стадии, основным из которых является резкое падение средней спектральной мощности сигнала [2, 3]. Однако анализ спектра затруднен из-за внешних шумов и неоднозначности интерпретации результатов.

Аппроксимация огибающей спектра позволяет упростить форму сигнала без существенной потери информации. В работе были протестированы два метода: аппроксимация полиномиальной функцией и аппроксимация с использованием набора нормальных распределений [4].

На рис. 1 представлен результат аппроксимации огибающей спектра ЭКГ СВР на разных этапах эксперимента («стабилизация», «ишемия», «реперфузия») с помощью полиномиальной функции.

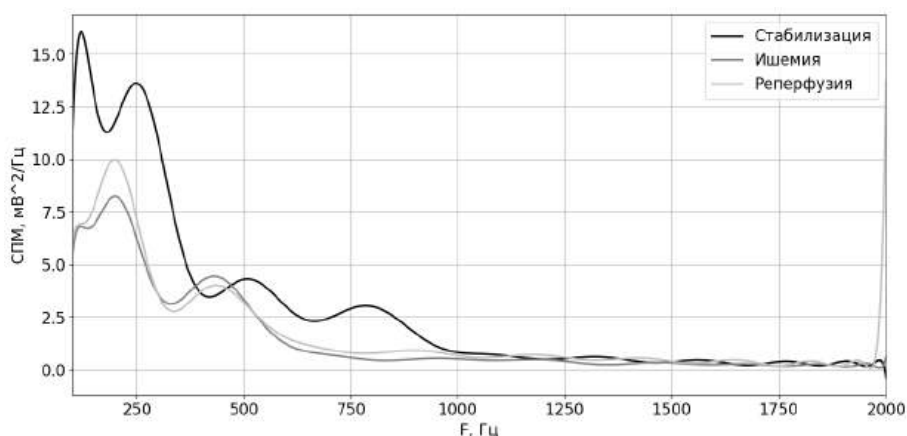


Рис. 1. Пример аппроксимации огибающей спектра ЭКГ СВР на разных этапах эксперимента с использованием полиномиальной функции

На рис. 2 показано сравнение формы огибающих спектра на разных этапах эксперимента, полученных с помощью алгоритма на основе нормальных распределений.

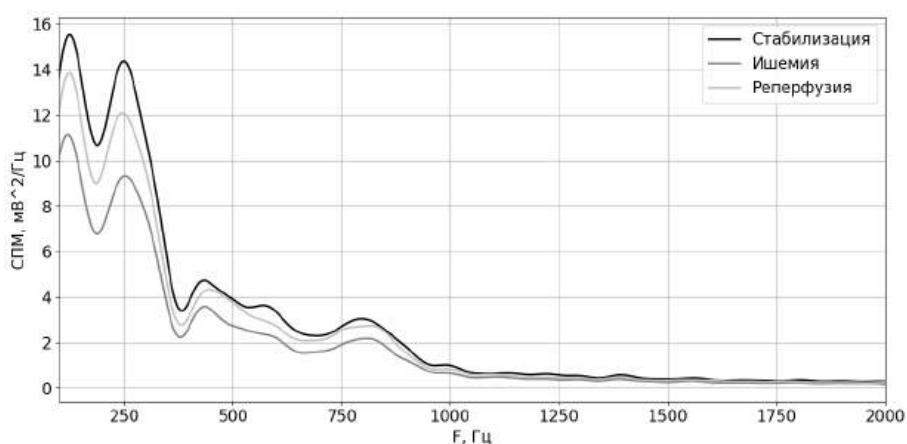


Рис. 2. Пример аппроксимации огибающей спектра ЭКГ СВР на разных этапах эксперимента с использованием набора нормальных распределений

Как видно из полученных графиков, значения огибающей на этапе «ишемия» значимо ниже, чем на этапе «стабилизация», во всем исследуемом диапазоне частот. Однако существенным минусом полиномиальной функции является резкое изменение наклона аппроксимирующей кривой на границах исследуемых областей.

Анализ таблицы 1 подтверждает, что аппроксимация с использованием нормальных распределений превосходит полиномиальный метод по всем рассмотренным критериям качества [5].

ТАБЛИЦА 1. Оценка качества аппроксимации огибающей спектра ЭКГ СВР

Параметр	Полиномиальная функция	Набор нормальных распределений
AIC	426	150
Log-Likelihood	-192	-25
R-squared	0.977	0.996
MSE	0.19	0.07

Полученные результаты позволяют заключить, что метод на основе нормальных распределений обеспечивает более высокую точность и интерпретируемость аппроксимации, что делает его предпочтительным для задач ранней диагностики ишемических изменений в экспериментах с использованием метода ЭКГ СВР.

Финансовая поддержка работы была оказана Минобрнауки РФ, номер гос. регистрации темы 125032604386-2.

Список используемых источников

1. Гуляев Ю. В., Зайченко К. В. Электрокардиография сверхвысокого разрешения. Задачи. Проблемы. Перспективы // Биомедицинская радиоэлектроника. 2013. № 9. С. 5-15.
2. Zaichenko K. V., Gurevich B. S., Kordyukova A. A. Method of Reliable Electrocardiographic Control of Ischemia Appearance in Investigations with Experimental Animals // 2021 Ural Symp. Biomed. Eng., Radioelectron. Inf. Technol. 2021. P. 78-81.
3. Зайченко К., Кордюкова А., Логачев Е., Лучкова М. Медицинские аспекты применения радиолокационных методов обработки сигналов при реализации электрокардиографии сверхвысокого разрешения // Медицинская техника. 2021. № 1. С. 21-24.
4. Xie S., Jin F., Krishnan S. Sparse approximation of long-term biomedical signals for classification via dynamic PCA // Int. Conf. IEEE Eng. Med. Biol. Soc. 2011. P. 67-70.
5. Hodson T., Over T., Foks S. Mean Squared Error, Deconstructed // Journal of Advances in Modeling Earth Systems. 2021. № 13. С. 26-29.

Статья представлена научным руководителем, заведующим лабораторией 235 ИАП РАН, доктором технических наук, профессором Б. С. Гуревичем.

**DEVELOPMENT AND EVALUATION OF SPECTRUM ENVELOPE
APPROXIMATION METHODS FOR ULTRA-HIGH RESOLUTION
ELECTROCARDIOSIGNAL PROCESSING**

Denisova E.

Institute for Analytical Instrumentation of the Russian Academy of Sciences

The ultra-high resolution electrocardiography (UHR ECG) method allows detecting early signs of myocardial ischemia; however, processing of high-frequency electrocardiosignals is complicated by noise and ambiguity in the interpretation of spectral data. Applying approximation of the spectrum envelope simplifies the analysis while preserving diagnostically significant information. This paper presents the development and comparative evaluation of two approximation methods: polynomial function approximation and approximation using a set of normal distributions. It is shown that the method based on normal distributions provides higher approximation quality according to AIC, MSE and R^2 criteria, confirming its potential for early diagnosis of ischemic changes.

Key words: *ultra-high resolution electrocardiography, approximation, polynomial function, set of normal distributions*

УДК 004.4'22

ГРНТИ 50.51, 28.23

НЕГАТИВНЫЕ СЦЕНАРИИ ПОВСЕМЕСТНОГО И БЕСКОНТРОЛЬНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В РАЗРАБОТКЕ ПО

Ю. В. Денисова

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В статье исследуются системные риски, вызванные бесконтрольной интеграцией ИИ-инструментов в процессы разработки программного обеспечения. Предложена классификация негативных сценариев, охватывающая аспекты информационной безопасности, технического долга и деградации компетенций разработчиков ПО. На основе актуальной статистики уязвимостей, возникших из-за использования ИИ-инструментов, доказывается необходимость изменения уровня автоматизации разработки. В качестве решения предложена концепция модели селективного внедрения ИИ в процесс разработки ПО, минимизирующая выявленные угрозы.

искусственный интеллект, генерация кода, информационная безопасность, технический долг, модель селективного внедрения, уязвимости ПО.

Массовое распространение больших языковых моделей сильно повлияло на индустрию создания программного обеспечения. ИИ-инструменты, способные автоматически генерировать код (такие, как, например, GitHub Copilot и Claude Code) существенно увеличили скорость его написания. Однако повсеместное и бесконтрольное использование ИИ-инструментов вызывает риски, не всегда заметные, которые ведут к ухудшению безопасности цифровой инфраструктуры и угрожающие ее стабильности.

Для начала стоит рассмотреть эти риски. Их можно распределить на три основные категории: то, что касается технологического уровня; то, что касается процессного уровня; то, что касается человеческого уровня. Каждую из категорий стоит рассмотреть поподробнее.

Технологический уровень подразумевает риски, которые обусловлены фундаментальной спецификой работы больших языковых моделей. Надо понимать, что они сначала разбивают полученный запрос на токены, присваивают этим токенам свои уникальные числовые идентификаторы, а после этого уже модель анализирует числа для того, чтобы на основе контек-

ста предсказать следующее слово или символ. Здесь не идет речь о понимании логики программы, безопасности, контекста приложения и так далее. Из этого следует, что на таком уровне могут появляться разного рода риски.

Например, это масштабирование паттернов уязвимого кода. ИИ обучается на уже существующих как правило открытых данных, в том числе устаревших, содержащих ошибки. В итоге ИИ-инструменты могут эти ошибки и уязвимости воспроизводить снова и снова, в том числе и критические дефекты. К ним относятся такие типовые уязвимости, как, например, CWE-89. (SQL-инъекции, благодаря которым злоумышленник может выполнять системные команды, как правило, изменяя SQL-запрос для перенаправления вывода в файл, который затем может быть выполнен) [1], или CWE-798 [2], т.е. использование небезопасных криптографических алгоритмов и наличие жестко закодированных учетных данных. Эта уязвимость может привести к раскрытию ресурсов или функциональности ПО злоумышленникам. При беглой проверке уязвимости такого рода могут остаться незамеченными.

Помимо этого, ИИ склонны к так называемым галлюцинациям, что проявляется и в написании кода. Например, ИИ может выдумать названия библиотек, пакетов, API-функций. Злоумышленники, со своей стороны, мониторят подобные аномалии, сканируя публичные репозитории на предмет попыток загрузки нестандартных или придуманных нейросетью названий, и найдя их, регистрируют пакеты с точно такими же именами в официальных репозиториях. В эти пакеты внедряют вредоносный код, который крадет учетные данные, токены API. Только за 2025 год кол-во вредоносных пакетов в репозитории Python Package Index (PyPI, основной каталог языка) выросло на 54 %. Это не просто точечная кибератака, она способна перейти в плоскость масштабных атак на цепочки поставок ПО.

Сюда же можно отнести так называемый архитектурный дрейф, когда с помощью ИИ-инструментов локально оптимизируется код, например, в рамках текущего экрана или функции. ИИ-инструменты, тем более в бесплатных версиях, не способны удерживать в памяти концептуальную архитектуру крупной информационной системы. В итоге повсеместная генерация разрозненных кусков кода приводит к тому, что единая система распадается на множество несвязанных, несогласованных или чрезмерно изолированных компонентов (сервисов).

Следующая категория рисков относится к процессному уровню, подразумевающему под собой рост технического долга и кризис контроля качества. Бесконтрольное внедрение ИИ смещает баланс между скоростью

написания кода и скоростью его верификации, что негативно влияет на классические методологии разработки (такие, как Agile и DevOps).

Во-первых, что касается технического долга. ИИ-инструменты, такие, как например GitHub Copilot, могут генерировать сотни строк кода за секунды. Это приводит к избыточности кодовой базы, из-за чего код становится громоздким, содержит много неиспользуемых конструкций и скрытых логических дублей. Такой код тяжело поддерживать, не говоря уже о том, что бы провести рефакторинг.

Во-вторых, стоит упомянуть так называемый «паралич code review». Это ситуация, когда процесс проверки кода останавливает весь пайплайн разработки. Традиционный процесс рецензирования кода рассчитан на объемы, созданные человеком, например, 200-400 строк кода изменений, которые вполне реально проверить. Когда один разработчик отправляет пулл-реквест, содержащий тысячи строк сгенерированного ИИ кода, другие члены команды физически не могут провести его глубокий аудит, проверка становится поверхностной, и этап ревью превращается в формальность, что сводит на нет ключевой барьер контроля качества.

В-третьих, немаловажный аспект касается лицензионных рисков, таких, как нарушение авторских прав на код из обучающей выборки для ИИ или риск случайного включения фрагментов под строгими лицензиями (например, GPL). Это грозит судебными разбирательствами.

Последний, и, наверное, самый значимый уровень касается человеческого фактора, это наиболее долгосрочный и трудно обратимый риск, так как влияет на умственные способности и поведение самих разработчиков.

Здесь стоит выделить, для начала, эффект «вайб-кодинга». Разработчики постепенно переходят от роли «создателей кода» к роли «редакторов», что порождает феномен избыточного доверия к технологиям и самоуверенности. Более того, разработчик перестает вникать в суть алгоритмов. Отсутствие когнитивного усилия при написании кода атрофирует навыки поиска нестандартных решений, а после и просто навыки построения логики кода.

За этим следует также и снижение квалификации уже молодых специалистов. «Джун» не просто так становится «сеньором», это естественный процесс накопления опыта, ведь традиционный рост разработчика происходит через преодоление трудностей при написании простых функций и рутинного кода. Если всю рутину за «джуна» выполняет ИИ, то такой разработчик не формирует базовых навыков и понимания работы программной

среды на низком уровне. В итоге формируется поколение разработчиков, которые без использования ИИ-инструментов и вовсе не умеет писать код.

В завершении стоит отметить, что из-за использования ИИ-инструментов возникает неопределенность в плане ответственности. Разработчик подсознательно перекладывает ответственность на ИИ, что снижает уровень персональной вовлеченности в надежность создаваемого кода.

Таким образом проблема генерации небезопасного кода становится массовой. Согласно данным исследователей из Технологического института Джорджии (Georgia Tech), опубликованным в марте 2026 года, только за один месяц было зафиксировано как минимум 35 новых публичных уязвимостей (записей CVE), ставших прямым следствием интеграции кода, созданного ИИ-инструментами [3]. Масштабный анализ 7703 файлов из публичных репозиторийев GitHub, результаты которого опубликованы на платформе arXiv, показал устойчивую тенденцию к росту числа архитектурных дефектов и отсутствия валидации входных данных в проектах, полагающихся на генеративные модели [4].

Для предотвращения критических последствий предлагается модель селективного внедрения ИИ в процесс разработки ПО. Ее суть заключается в отказе от повсеместного и сквозного применения нейросетей на всех этапах жизненного цикла ПО.

Для этого предлагается расчет рисков и контекста кода с помощью специальной матрицы, после чего принимаем решение о возможности использования ИИ-инструментов в написании кода, а также степени участия ИИ-инструментов, от делегирования небольших задач до полного отказа и перехода к ручной разработке.

Ключевыми элементами предложенной модели являются такие модули, как: модуль аудита задачи, матрица критериев для отбора задач, модуль оценки рисков и возможности применения, система метрик для оценки результата, модуль валидации, а также стратегии минимизации рисков.

При этом модель базируется на трех уровнях изоляции:

- ИИ полностью отключается при проектировании критических компонентов (таких, как ядро системы, криптографические модули, подсистемы аутентификации);
- любой сгенерированный с помощью ИИ-инструментов фрагмент кода в обязательном порядке проходит через локальные pre-commit хуки статического (SAST) и динамического (DAST) анализа безопасности еще до этапа код-ревью;

– внедрение метрики соотношения участия ИИ-инструментов и разработчика, что ограничивает допустимый процент сгенерированного кода в пулл-реквестах для сохранения контроля человека над логикой разрабатываемого ПО.

В заключение стоит сказать, что повсеместное и неконтролируемое использование искусственного интеллекта в разработке программного обеспечения создает иллюзию продуктивности, скрывая за собой долгосрочные угрозы безопасности и надежности разрабатываемых информационных систем. Переход от часто используемой сейчас модели избыточного использования ИИ-инструментов к модели селективного внедрения позволит сохранить жесткий контроль над качеством ПО.

Список используемых источников

1. CWE-89: Improper Neutralization of Special Elements used in an SQL Command ('SQL Injection') // MITRE URL: <https://cwe.mitre.org/data/definitions/89.html> (дата обращения: 30.05.2026).
2. CWE-798: Use of Hard-coded Credentials // MITRE URL: <https://cwe.mitre.org/data/definitions/798.html> (дата обращения: 30.05.2026).
3. Security Researchers Sound the Alarm on Vulnerabilities in AI-Generated Code // Infosecurity Magazine URL: <https://www.infosecurity-magazine.com/news/ai-generated-code-vulnerabilities/> (дата обращения: 30.05.2026).
4. M Schreiber, P Tippe Security Vulnerabilities in AI-Generated Code: A Large-Scale Analysis of Public GitHub Repositories // International Conference on Information and Communications Security, 2025. Luxemburg: Springer, 2025.

статья представлена научным руководителем, доцентом кафедры СОД СПбГУТ, кандидатом технических наук Ю. М. Боромянским.

NEGATIVE SCENARIOS INVOLVING THE WIDESPREAD AND UNREGULATED USE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN SOFTWARE DEVELOPMENT

Denisova Yu.

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

This article examines the systemic risks caused by the uncontrolled integration of AI tools into software development processes. A classification of negative scenarios is proposed, covering aspects of information security, technical debt, and the erosion of software developers' competencies. Based on current statistics on vulnerabilities arising from the use of AI tools, the article demonstrates the need to adjust the level of development automation. As a solution, the article proposes a concept for a model of selective AI implementation in the software development process, which minimizes the identified threats.

Key words: artificial intelligence, code generation, information security, technical debt, phased implementation model, software vulnerabilities

УДК 004.65

ГРНТИ: 20.53.00

**ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ВАЛИДАЦИЯ И МИНИМИЗАЦИЯ ОШИБОК
ЗАПОЛНЕНИЯ XML-СООБЩЕНИЙ ПРИ МЕЖСИСТЕМНОМ
ОБМЕНЕ В БАНКОВСКИХ ИС****Ю. В. Денисова, А. Р. Кушнир**

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В работе исследуется проблема предварительной валидации XML-документов, которые используются при обмене данными между банковскими информационными системами. Рассматриваются распространенные категории ошибок: нарушение синтаксиса, несоответствие структуре, логические противоречия, некорректное заполнение тегов и иные ограничения бизнес-логики. Отдельное внимание уделено совместному применению XSD-схем и Schematron. Также описывается использование XPath-выражений при построении механизмов контроля. Предложенный подход позволяет сократить число ошибок при обработке сообщений, повысить достоверность передаваемых данных и упростить выявление проблем еще до отправки XML-документа во внешние банковские сервисы.

XML, XSD, Schematron, XPath, межсистемный обмен, банковские информационные системы, предварительная валидация, прикладная валидация, ошибки заполнения реквизитов, бизнес-правила, диагностические сообщения

С развитием цифровизации банковского сектора особое значение приобретает надежный межсистемный обмен данными. Одним из широко используемых форматов передачи структурированной информации между информационными системами является XML [1]. Данный формат применяется при взаимодействии внутренних банковских модулей, интеграции с внешними сервисами, при передаче документов в специальные комплексы обработки. Корректность заполнения XML-документов напрямую влияет на устойчивость автоматизированных бизнес-процессов, качество обработки данных и снижение рисков.

На практике значительная часть ошибок, которые возникают при обработке XML-документов, связана не с нарушением общей структуры документа, а с некорректным заполнением полей. К таким нарушениям относятся использование недопустимых символов, ошибки в формате данных, нарушение правил заполнения реквизитов, несоблюдение прикладных огра-

ничений, которые не могут быть описаны средствами схемной валидации. В результате даже формально корректный XML-документ может быть отклонен на этапе обработки или привести к возникновению ошибок в целевых системах.

В связи с этим особенно актуальны задачи, связанные с предварительной валидацией данных перед отправкой XML-документов в комплексы обработки. Использование специализированных сервисов проверок позволяет выявить типовые нарушения на ранних этапах, снижать вероятность отказов в дальнейшей обработке документов.

Целью исследования является анализ типовых ошибок заполнения XML-документов в банковском секторе и рассмотрение подхода к их автоматизированному выявлению до передачи документов в комплексы обработки.

Для описания структуры XML-документов и ограничений на их содержимое применяются XML Schema (XSD) [2]. В банковской сфере XML-ориентированные форматы используются при обмене данными между сервисами или различными участниками, в том числе с Банком России, Росфинмониторингом [3, 4].

Проблема заключается в том, что соответствие XML-документа структуре и XSD-схеме не гарантирует корректности заполнения реквизитов. Часть требований к данным носит прикладной характер и не всегда целесообразно полностью описывать их на уровне схемы. Также при межсистемном обмене требуется не просто установить факт некорректности документа, а предоставить пользователю понятную диагностику: определение неверно заполненного поля, путь до него, описание нарушенного правила. При изменении требований или внутренних правил организации необходим механизм оперативного обновления набора проверок без существенной переработки всего процесса формирования документа.

Таким образом, известные решения в виде стандартной XSD-валидации решают задачу структурного контроля, но не покрывают задачу прикладной валидации реквизитов. На практике это требует дополнительного слоя специализированных проверок, выполняемых до отправки XML-документа в целевой комплекс обработки.

Ошибки XML-документов, возникающие при межсистемном обмене, можно рассматривать на нескольких уровнях. К первому уровню относятся синтаксические ошибки, при которых XML-документ не является кор-

ректно сформированным. Например, документ может содержать незакрытый тег. Такие ошибки препятствуют чтению документа XML-парсером.

Ко второму уровню относятся структурные ошибки. В этом случае XML-документ может быть синтаксически корректным, но не соответствовать XSD-схеме. Например, документ может содержать некорректный тип данных или в нем отсутствует обязательный тег.

К третьему уровню относятся логические ошибки. Они могут быть связанными, как с отдельным, так и со множественными значениями. Например, если заполнен тег кода валют, то тег суммы должен иметь числовой формат и должен быть заполнен.

К четвертому уровню можно отнести прикладные ошибки, которые возникают во время заполнения реквизитов. Они появляются в том случае, когда XML-документ соответствует XSD-схеме, но отдельные значения заполнены некорректно с точки зрения требований организаций. Например, тег ИНН может иметь недопустимую длину или содержать недопустимые символы.

Исследование проблемы минимизации ошибок в XML-сообщениях требует их идентификации. На четвертом уровне расположены прикладные ошибки заполнения данных, которые классифицируются на несколько основных групп.

К первой группе можно отнести ошибки формата. Сюда относятся нарушения требований к минимальной и максимальной длине тега, использование недопустимых символов, наличие букв в цифровых полях и наоборот. Для данного уровня примером является некорректная длина ИНН.

Ко второй группе относятся ошибки позиционных ограничений. Даже при условии допустимого набора символов тег может быть неправильным из-за того, что начинается на недопустимый символ, само значение может быть неправильным, или показатели внутри тега могут стоять не на своих местах. Например, может быть указана будущая дата из-за ошибки ввода.

К третьей группе относятся ошибки заполненности. Некоторые теги могут отсутствовать, но при их заполнении значения обязаны полностью соответствовать требованиям. В некоторых случаях тег присутствует, но содержит пустую строку или набор пробелов, что не отвечает правилам бизнес-логики.

К четвертой группе относятся ошибки идентификаторов и кодов. Для некоторых реквизитов требуется строго фиксированная длина и строго определенный состав символов. Даже единичное отклонение делает показа-

тель непригодным для дальнейшей обработки. К таким реквизитам могут относиться ИНН, ОГРН, КПП, БИК и иные идентификаторы, используемые в банковских системах.

В качестве подхода к решению обозначенной проблемы рассматривается применение специализированных сервисов проверок, выполняющих прикладную валидацию данных до отправки XML-документа в комплекс обработки. Основу для данного подхода составляет использование языка Schematron, который предназначен для валидации XML-документов на основе правил [6].

В отличие от XSD, который ориентирован на описание структуры документа, типов данных и базовых ограничений, Schematron позволяет формализовать правила контроля с использованием XPath-выражений и формировать диагностические сообщения по результатам проверки [2, 6]. При этом Schematron целесообразно рассматривать не как замену XSD, а как дополнение к нему. XSD используется для проверки структурированной корректности XML-документа, а Schematron – для проверки прикладных правил, которые зависят от значений реквизитов, их взаимосвязей и бизнес-логики обработки.

В Schematron каждое правило задается для определенного контекста XML-документа. Контекст определяется с помощью XPath-выражения, которое позволяет обратиться к конкретному элементу или группе узлов XML-документа. XPath в данном случае используется как механизм навигации по XML-документу. Для выбранного контекста задается условие, которое должно выполняться. Если условие нарушено, то формируется диагностическое сообщение, которое указывает на ошибку.

Для обоснования необходимости совместного применения XSD и Schematron целесообразно сопоставить их возможности при проверке XML-документов. Основные различия между указанными средствами валидации представлены в таблице 1.

Как видно из таблицы 1, XSD и Schematron решают разные, но взаимодополняющие задачи. Поэтому при предварительной валидации XML-документов целесообразно использовать XSD для проверки структуры документа, а Schematron – для контроля прикладных правил заполнения реквизитов и формирования понятной диагностики ошибок.

ТАБЛИЦА 1. Сравнение XSD и Schematron как средств валидации XML-документов

Критерий	XSD	Schematron
Основное назначение	Проверка структуры XML-документа	Проверка прикладных правил
Что проверяет	Наличие элементов, типы данных, порядок следования, базовые ограничения	Условия заполнения, взаимосвязи реквизитов, бизнес-правила
Работа со структурой документа	Основной механизм контроля	Используется через XPath-контекст
Проверка сложных условий	Ограничена возможностями схемы	Поддерживается через XPath-выражения
Диагностические сообщения	Обычно зависят от используемого валидатора	Могут задаваться явно для каждого правила
Гибкость изменения правил	Требует изменения схемы	Позволяет изменять отдельные правила
Роль в предварительной валидации	Структурный контроль	Прикладной контроль данных

Новизна предлагаемого подхода заключается в том, что валидация рассматривается не как исключительно схемная проверка XML-документа, а как отдельный прикладной этап контроля качества данных, интегрированный в процесс межсистемного взаимодействия.

Практическая значимость решения выражается в снижении количества отказов при обработке XML-документов, сокращении времени на поиск причин ошибок, уменьшении объема ручных корректировок и повышении качества данных до момента их передачи в целевые комплексы обработки.

В банковской сфере применяются специализированные решения для контроля корректности XML-документов. Но несмотря на это остается актуальной задача формализации типовых ошибок заполнения реквизитов вместе с организацией предварительной валидации с диагностикой нарушений.

Проведенный анализ показал, что существенная доля ошибок XML-документов в банковских системах связана не с нарушением структуры файла, а с некорректным заполнением отдельных реквизитов и несоблюдением требований. XSD-валидация позволяет выявить нарушения корректности XML-документа и его несоответствие схеме, но не обеспечивают проверку сложных условий и взаимосвязей между реквизитами. Это указывает на необходимость в использовании не только XSD-валидации, но и дополнительных средств контроля бизнес-логики данных. Рассмотренный подход, который основан на применении специализированного сервиса проверок бизнес-правил, повышает точность обнаружения ошибок и уменьшает

вероятность отказов при следующей обработке документов. К его преимуществам относятся гибкость настройки, возможность расширения, адаптация к изменяемым требованиям и формирование понятных диагностических сообщений для пользователя.

Список используемых источников

1. Extensible Markup Language (XML) 1.0 (Fifth Edition). W3C Recommendation. 2008. URL: <https://www.w3.org/TR/REC-xml/> (дата обращения: 26.04.2026).
2. XML Schema Definition Language (XSD) 1.1 Part 1: Structures. W3C Recommendation. 2012. URL: <https://www.w3.org/TR/xmlschema11-1/> (дата обращения: 26.04.2026).
3. XML Schema Definition Language (XSD) 1.1 Part 2: Datatypes. W3C Recommendation. 2012. URL: <https://www.w3.org/TR/xmlschema11-2/> (дата обращения: 27.04.2026).
4. Описания форматов электронных сообщений для сбора отчетных данных на основе спецификации XML. М.: Банк России. URL: https://www.cbr.ru/development/kliko/xml_f/ (дата обращения: 02.05.2026).
5. Унифицированные форматы электронных банковских сообщений Банка России. Обмен с клиентами Банка России. М.: Банк России. URL: <http://cbr.ru/analytics/Formats/> (дата обращения: 02.05.2026).
6. ISO/IEC 19757-3. Information technology Document Schema Definition Languages (DSDL) Part 3: Rule-based validation Schematron. ISO. 2020. URL: <https://www.iso.org/standard/74515.html> (дата обращения: 02.05.2026).

Статья представлена научным руководителем, доцентом кафедры СОД СПбГУТ, кандидатом технических наук Ю. М. Бородянским.

PRELIMINARY VALIDATION AND MINIMIZATION OF ERRORS IN FILLING XML-MESSAGES DURING INTERSYSTEM EXCHANGE IN BANKING IS

Denisova Yu., Kushnir A.

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

This article examines the preliminary validation of XML messages during intersystem exchange in banking information systems. Typical data entry errors are described, including syntactic, structural, and logical errors, as well as errors related to attribute formats, required fields, identifiers, and business rules. Particular attention is paid to the combination of XSD schemas and Schematron: XSD is used to validate document structure, data types, and required elements, while Schematron is used to identify more complex logical conditions and dependencies. The principles of XPath expressions in generating validation rules are discussed, and examples of possible checks and validation stages are provided. The proposed approach reduces the number of message processing failures, improves data quality, and simplifies error diagnostics before transmitting XML documents to external banking systems.

Key words: XML, XSD, Schematron, XPath, intersystem exchange, banking information systems, preliminary validation, application validation, errors in filling in details, business rules, diagnostic messages

УДК 004.855.5

ГРНТИ 28.23.37

СИСТЕМА ОЦЕНКИ И ВЫБОРА ХОДОВ В ШАХМАТАХ НА БАЗЕ АРХИТЕКТУРЫ TRANSFORMER

О. Н. Злобин, В. Л. Литвинов, Ф. В. Филиппов

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В статье рассматривается разработка и оценка нейросетевого шахматного движка, основанного на архитектуре Transformer, обученного методом контролируемого обучения на данных, размеченных классическим движком Stockfish. Актуальность работы обусловлена поиском баланса между вычислительной эффективностью и качеством игры в условиях ограниченных ресурсов, характерных для встраиваемых систем и аналитических приложений. Предложена модель, которая принимает на вход пространственное представление шахматной позиции и генерирует два выходных сигнала: распределение вероятностей по допустимым ходам (policy) и скалярную оценку позиции (value). Описан процесс формирования датасета из 50 миллионов позиций, фильтрация данных для устранения шума разметки и процедура обучения многозадачной модели.

большие языковые модели, Transformer, оценка позиции, policy network, value network

Современные шахматные программы достигли сверхчеловеческого уровня игры преимущественно за счет комбинации эффективного поиска (Alpha-Beta, Monte Carlo Tree Search) и глубоких нейросетевых архитектур [1]. Однако, высокая вычислительная сложность таких гибридных систем ограничивает их применение на устройствах с низким энергопотреблением или в сценариях, требующих мгновенного отклика. Альтернативой является использование чистых нейросетевых моделей (move prediction), которые действуют как "быстрые" эксперты, но уступают в силе игры гибридным подходам [2].

В данной работе исследуется возможность создания эффективного шахматного движка на базе архитектуры Transformer [3], обученного исключительно на данных, сгенерированных движком Stockfish. Выбор Transformer обусловлен его способностью обрабатывать глобальные зависимости на доске, в отличие от сверточных сетей, требующих большего числа слоев для передачи контекста. Целью работы является не достижение сверхчеловеческого уровня игры, а получение количественных характери-

стик (точность, скорость, ошибки) модели, которую можно масштабировать под различные вычислительные бюджеты.

Алгоритм поиска оптимальных ходов

Традиционные шахматные движки, такие как Stockfish, Komodo и их предшественники, используют алгоритм Alpha-Beta поиска с множеством эвристических улучшений [4]. Alpha-Beta является оптимизацией полного перебора дерева игры, позволяющей отсекаать ветви, которые заведомо не могут улучшить текущую оценку (рис. 1). Базовый принцип заключается в поддержании двух границ – альфа (нижняя граница оценки для максимизирующего игрока) и бета (верхняя граница для минимизирующего игрока). Если в процессе перебора оценка хода становится хуже бета для максимизирующего игрока или лучше альфа для минимизирующего, дальнейший поиск в данной ветви прекращается. В классической реализации Alpha-Beta поиск выполняется на фиксированную глубину, после чего применяется статическая оценочная функция, вычисляющая материальный баланс и позиционные факторы.

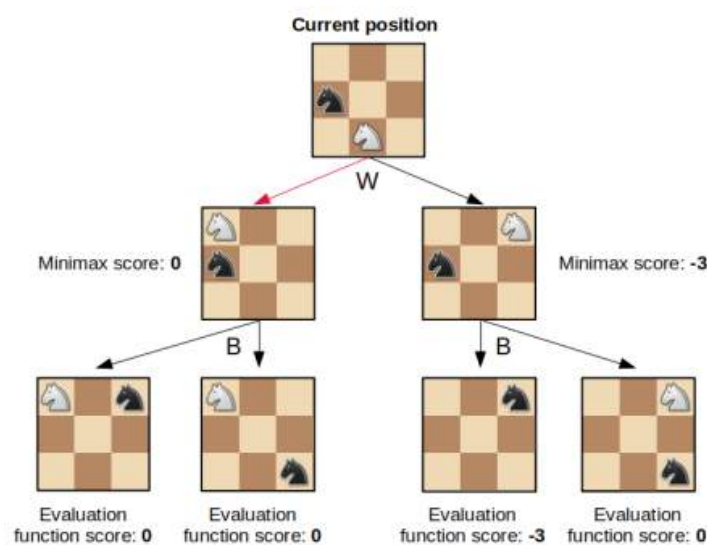


Рис. 1. Дерево поиска вариантов

Формализуем задачу как обучение функции $f: X \rightarrow (P, V)$, где:

$x \in X$ – шахматная позиция, представленная в виде тензора признаков.

$A(x) = \{a_1, a_2, \dots, a_k\}$ – множество допустимых (легальных) ходов в позиции xx .

Целевая policy-компонента: либо лучший ход a^* , найденный учителем (алгоритмом перебора), либо распределение вероятностей $p_{teacher}(a|x)$ по

ходам (при использовании MultiPV). В данной работе используется распределение $p(a|x)$, пропорциональное экспоненте оценок ходов.

Целевая value-компонента: оценка позиции $v_{\text{teacher}}(x)$ в сантипешках (cp) с точки зрения текущей стороны хода. Положительное значение означает преимущество белых.

Учет стороны хода реализован путем преобразования позиции к перспективе текущего игрока. Легальность хода обеспечивается на этапе инференса путем маскирования logits недопустимых ходов перед применением Softmax. В ситуациях мата целевая оценка value устанавливается в $\pm 1500 \pm 1500$ cp (условная победа/поражение), а policy обучается предсказывать единственный ход (матующий), если он однозначен.

Данные и разметка

Датасет сформирован из миллионов уникальных позиций, извлеченных из партий высокого рейтинга (2700+) и самогенерированных игр. Применена фильтрация: удалены позиции с количеством фигур менее 4 (для избежания перекоса в эндшпиле), позиции с повторением ходов (для стабильности оценки), а также дубликаты позиций с разной оценкой (оставлена позиция с наибольшей глубиной разметки).

Формирование датасета осуществлялось путем извлечения позиций из двух основных источников: общедоступного корпуса партий высокого уровня (рейтинг игроков не менее 2600 Elo) и самогенерированных партий, сыгранных между экземплярами Stockfish 16 с контролем времени 1 секунда на ход для генерации разнообразных позиций различного уровня сложности. Общий объем собранного массива составил 52 миллиона уникальных позиций. Мы отсеивали позиции по нескольким четким правилам. Первое: убрали все, где на доске оставалось меньше четырех фигур – в таких эндшпилях оценка слишком чувствительна к точности расчета, и там нужна принципиально иная архитектура, наша тут не работает. Второе: исключали позиции с троекратным повторением или нарушением правила 50 ходов. У них оценка дискретная, а не непрерывная, и она вносит хаос в наше целевое значение оценки позиции value.

Кроме того, мы провели дедупликацию. Если одна и та же позиция встречалась в разных партиях с разной оценкой, мы оставляли ту, что размечена на бóльшую глубину. Это заметно очистило обучающие данные от шума.

Разметка была выполнена на современном движке Stockfish 16, собранном с расчетом на многопоточность (на четырех потоках). Для каждой позиции жестко зафиксирована глубина в 24 полухода (ply), при этом не ставилось никаких лимитов по времени. Таким образом, мы добились полной воспроизводимости результатов.

Кроме того, был включен режим MultiPV с параметром 5. Это дало не просто один лучший ход, а сразу пятерку альтернатив с их оценками. Такая «вилка» оценок легла в основу policy-компоненты – мы получили не точечное предсказание, а распределение вероятностей по возможным ходам.

Оценки ходов в режиме MultiPV преобразовывались в вероятности с помощью softmax-преобразования с температурой 0.8, что позволило сгладить излишнюю уверенность учителя в единственном ходе. Для исключения позиций с нестабильной оценкой из обучающей выборки удалялись позиции, в которых оценка лучшего хода изменялась более чем на 25 центи-пешек при пересчете с глубины 22 полухода на глубину 26 полуходов; такие позиции составляли около 3 % от исходного массива и рассматривались как потенциальные источники противоречивых целевых значений.

Архитектура модели

Архитектура представляет собой трансформерный энкодер с двумя специализированными головами для предсказания распределения по ходам (policy) и оценки позиции (value). Выбор трансформера обоснован его способностью моделировать глобальные зависимости между фигурами без ограничений рецептивного поля.

Представление входа. Позиция кодируется тензором размерности $8 \times 8 \times 119$ с приведением к перспективе текущего игрока. Каналы включают one-hot-кодирование фигур (12 каналов), права на рокировку (4), очередь хода (1), историю последних восьми ходов (16), контроль полей и повторения позиции. Каждый клеточный вектор размерности 119 проецируется в эмбединг размерности 512, после чего суммируется с обучаемым абсолютным позиционным кодированием.

Backbone. Модель содержит 12 слоев трансформерного энкодера с 16 головами внимания, размерностью скрытого пространства 512 и размерностью FFN 2048.

Архитектура построена вокруг двух ключевых «голов», каждая отвечает за свое (рис. 2). В общей части применяется pre-layer нормализация,

дропаут 0.1, а в FFN – активация Swish. Всего модель имеет 47 миллионов параметров.

В Policy head выходы энкодера свернуты через глобальный средний пулинг, а затем прогоняются через трехслойный MLP размерности $(512 \rightarrow 1024 \rightarrow 512 \rightarrow 4672)$ с GELU и дропаутом между слоями. Полученный вектор логитов (4672 числа) маскируется – все запрещенные ходы заменяются на минус бесконечность, чтобы они не влияли на итоговую вероятность. Далее использован softmax для получения на выходе распределения по всем легальным ходам.

Value head работает иначе. Мы добавляем в начало последовательности специальный [CLS]-токен, используем его как агрегированное состояние. Его вектор размерности 512 пропускается через двухслойный MLP $(512 \rightarrow 256 \rightarrow 1)$ с функцией активации Tanh на выходе, а затем масштабируется в диапазон от -1500 до $+1500$ сантипешек – это привычный для шахмат диапазон оценок.

При этом мы обучаем обе головы одновременно. Это дает синергию, policy заставляет модель вылавливать действительно значимые ходы, а value не дает оценке «уплывать», делая предсказания стабильными. Вместе они работают лучше, чем по отдельности.

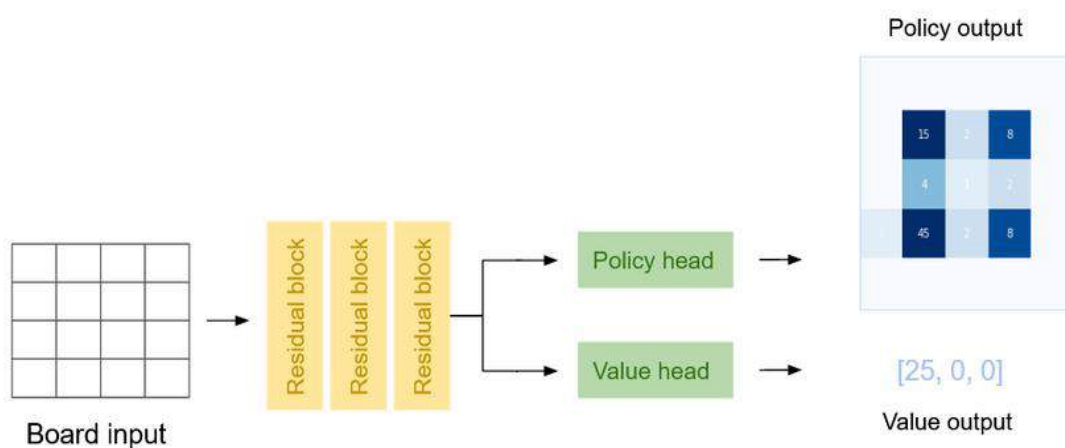


Рис. 2. Архитектура модели

Чтобы понять, какая часть архитектуры за что отвечает, были проведены абляционные эксперименты.

Отключение policy-головы обрушивает Top-1 точность на 14.2 процентных пункта, а рейтинг Elo проседает на 187 пунктов. Это прямо говорит о том, что policy критически важна для тактической зоркости, без нее дви-

жок хуже упорядочивает ходы в переборе и чаще пропускает острые варианты.

Отключение value-головы не так катастрофично сказывается на тактике, зато резко ухудшает эндшпиль, игра становится нестабильной, и мы теряем еще 93 пункта Elo. То есть value отвечает за «чувство оценки» в упрощенных позициях.

По весам в функции потерь мы перебирали разные соотношения и остановились на 1:0.8 в пользу policy – это дало лучший баланс между качеством ходов и стабильностью оценки.

Что касается глубины разметки, то переход с 16 на 24 полухода принес внушительный плюс 76 Elo. А вот следующий шаг до 32 полуходов всего +28, при том, что вычислительные затраты на генерацию данных выросли втрое.

В целом эксперименты подтвердили гипотезу, что связка трансформера с контролируемым обучением на качественной разметке дает отличную основу для движка, где можно гибко жонглировать между быстродействием и силой игры. Нейросетевые policy и value в паре с классическим Alpha-Beta-поиском – золотая середина: мы не теряем тактическую мощь традиционного перебора, при этом радикально улучшаем позиционное чутье за счет глубоких представлений нейросети.

Заключение

Таким образом, разработан шахматный движок на трансформерной архитектуре, обученной с учителем. Авторам хотелось найти золотую середину, чтобы модель играла сильно, но при этом не требовала суперкомпьютера и могла работать в условиях жестких ограничений по времени или ресурсам, например, для мобильных устройств или систем, где решение нужно принимать за доли секунды.

На тесте точность угадывания хода учителя (Top-1) равна 54.7 %, а среди трех лучших вариантов (Top-3) – 79.2 %. Это уровень сверточных сетей сопоставимого размера, так что мы ничего не потеряли при смене архитектуры.

В реальных партиях гибридный режим на глубину 8 полуходов обыграл чистую нейросеть (без поиска) на 312 Elo. Очевидно, что связка нейросети с традиционным перебором дает ощутимый выигрыш.

Список используемых источников

1. McIlroy-Young R., Sen A., Kleinberg J., Anderson A. Aligning Superhuman AI with Human Behavior: Chess as a Model System. Proceedings of the 26th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining. 2020. PP. 1677-1687. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2006.01855> (дата обращения: 30.05.2026).
2. Ruoss A., Delétang G., Medapati S., Grau-Moya J., Wenliang L.K., Catt E., Reid J., Lewis C.A., Veness J., Genewein T. Amortized Planning with Large-Scale Transformers: A Case Study on Chess. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2402.04494> (дата обращения: 30.05.2026).
3. Vaswani A., Shazeer N., Parmar N., Uszkoreit J., Jones L., Gomez A.N., Kaiser Ł., Polosukhin I. Attention Is All You Need. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1706.03762> (дата обращения: 30.05.2026).
4. Silver D., Hubert T., Schrittwieser J., Antonoglou I., Lai M., Guez A., Lanctot M., Sifre L., Kumaran D., Graepel T., Lillicrap T. A General Reinforcement Learning Algorithm That Masters Chess, Shogi, and Go Through Self-Play. Science. 2018. Vol. 362. N 6419. PP. 1140-1144. URL: <https://doi.org/10.1126/science.aar6404> (дата обращения: 30.05.2026).

A SYSTEM FOR EVALUATING AND SELECTING MOVES IN CHESS BASED ON THE TRANSFORMER ARCHITECTURE**Zlobin O., Litvinov V., Filippov F.**

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

The article discusses the development and evaluation of a neural network chess engine based on the Transformer architecture, trained by supervised learning on data marked up by the classic Stockfish engine. The relevance of the work is due to the search for a balance between computational efficiency and game quality in conditions of limited resources, typical for embedded systems and analytical applications. A model is proposed that takes a spatial representation of a chess position as input and generates two output signals: a probability distribution over acceptable moves (policy) and a scalar estimate of the position (value). The process of forming a dataset of 50 million positions, filtering data to eliminate markup noise, and the procedure for training a multitasking model is described.

Key words: large language models, Transformer, position assessment, policy network, value network

УДК 004.89
ГРНТИ 28.23

ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ АЛГОРИТМОВ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

Л. П. Козлова, О. А. Козлова, О. В. Раковский

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Многообразие нечетких алгоритмов в современном мире позволяет создать концепции, которые будут отвечать самым сложным требованиям и применяться в промышленных и бытовых задачах. Это особенно становится актуально ввиду того, что все больше систем обладают признаками интеллектуализации. Отдельной задачей становится создание системы, полноценно относящейся к понятию искусственного интеллекта. В статье будут рассмотрены основные принципы построения нечетких систем, их достоинства, недостатки и возможность их преодоления.

нечеткие системы, технологический процесс, степень принадлежности, интеллектуализация

Понятие интеллектуальных систем надежно усвоилось во всех сферах человеческой деятельности. И действительно, если посмотреть весь спектр применения алгоритмов, входящих в понятие искусственного интеллекта, то сразу становится очевидно, что это не одноразовое явление и уже даже не начало развития направления. Автономные вероятностные системы; умные системы, контролирующие дорожное движение, причем, не только от нарушений, но и просто, чтобы разгрузить трафик; колонки, способствующие голосовому управлению различными устройствами в домашних условиях и многое другое – все это уже успешно функционирует и развивается.

Что же, собственно, представляет из себя интеллектуальная система? Понятно, что, в первую очередь, речь идет о наделении автоматизированной системы управления способностями человеческого восприятия действительности и возможностью реагировать на любые внешние и внутренние воздействия, даже если они не присутствуют в исходных параметрах.

В общем случае, будем выделять из интеллектуальной системы следующие составляющие, которые как раз и позволяют воспроизводить весь процесс:

- механизм получения внешней информации, который может включать в себя как автономные датчики, так и панели, регулируемые человеком;
- механизм, позволяющий обработать первичную информацию в данные, пригодные для дальнейшего хранения и анализа;
- функциональные структуры, которые на основе полученных данных и заложенной базы знаний принимают решение о реакции системы в данном конкретном случае;
- механизм, приводящий непосредственно исполнительные устройства в действие [1].

Вроде бы, такая система имеет линейную структуру, вот только не все так просто.

Действительно, если речь идет о детерминированной системе, где все входящие данные строго определены, внутренние воздействия зафиксированы и внешние воздействия не несут существенного влияния на систему, то можно назвать этот процесс линейным. Однако, если речь идет о системе, где на вход могут попасть данные, не предусмотренные исходным проектированием, либо по совокупности данных требуется нетривиальное решение, то система входит в спектр плохо формализуемых алгоритмов и требует нестандартизированного подхода в каждой подобной ситуации.

Обозначим те проблемные сферы, которые заслуживают особого внимания:

- система априори может быть плохо структурирована, что, в свою очередь означает невозможность выделить полноценные разделы функционирования и влияния;
- классы систем могут быть максимально схожи, на первый взгляд, но иметь принципиальное отличие, важное для конкретной ситуации;
- идентичные входные параметры в нетипизированных условиях могут дать различные исходы функционирования системы;
- если система включает в себя самоорганизующиеся элементы, то они сразу подпадают под класс стохастических, что не позволяет задать жесткую формализованную структуру;
- любая сложная система предполагает наличие различных значимых функциональных параметров, которые могут быть конфликтными друг для друга; причем, некоторые такие показатели не требуют максимального значения для эффективного функционирования системы.

Отсюда, выделим те моменты, которые требуют решения в каждой системе:

- определение основной задачи, из которой, в последствии выявляются факторы, влияние которых носит значимый характер для системы;
- определение факторов, влияющих на систему извне: понятно, что ни один процесс не функционирует в идеальных внешних условиях, а, значит, необходимо внимательно прорабатывать все воздействия, с последующим использованием нужных реакций и исключая вредоносные.

С другой стороны, необходимо обратить внимание на следующие проблемы, возникающие в реальных системах:

- исходные данные, которые считывают системы первичной обработки, могут быть неполные, носить нечисловой характер или вообще практически отсутствовать;
- при идентичных условиях или их отсутствии, система может пойти по разному пути функционирования;
- структура системы может иметь изменчивый характер.

Все это вместе взятое требует алгоритмов, которые бы отличались от стандартного принципа реализации.

Одной из таких методологий может стать нечеткая логика.

Классическая система предполагает всегда абсолютную принадлежность при том, что отдельные элементы могут включать в себя несколько параметров. Это дает жесткую плохо варьлируемую структуру и исключает те значения, которые носят сколь угодно меньший показатель. Таким образом, легко потерять важные показатели.

В противовес нечеткие системы оперируют понятием степени принадлежности, что позволяет сохранить и использовать все значения до момента принятия решения.

Важными требованиями тут является:

- сумма всех степеней принадлежности для одного объекта всегда дает 1;
- в случае, если у объекта есть только один параметр, то его степень принадлежности неизменно равна единице;
- отсутствие параметра у объекта дает значение 0, для степени принадлежности;
- хотя бы один параметр дает степень принадлежности больше 0 для объекта.

Далее формализуем: обозначим степень принадлежности – $MF(\omega)$, а нечеткое множество – C , тогда можно сформулировать, что $C = \{MF(\omega)/\omega\}, MF(\omega) \in [0,1]$.

Теперь можно определить принцип работы нечеткой модели в системе:

1. Получение нечетких данных и преобразование их в вектор нечетких множеств – фазификация;
2. Для каждого параметра формирование одного или нескольких нечетких правил, которые представляются в форме «Если <условие>, то <результат>»;
3. Применение логических операций для связывания правил: важной особенностью является то, что таблица истинности для логических операций в нечеткой логике отличается от таблицы истинности для классических систем, особенность вносит именно степень принадлежности;
4. Процесс выбора из набора данных тех, которые дают оптимальное решение текущей проблемы – дефазификация;
5. Оценка результатов.

Внедрение алгоритмов нечеткой логики может проводиться на всех этапах работы интеллектуальной системы. Как пример, можно привести задачу классификации данных. Именно тут может появиться неоднородность значений, что, в свою очередь, требует отдельного выбора [2].

Как уже описывалось ранее, многие показатели не требуют своих максимальных параметров при функционировании, но проблема в том, что, во-первых, чем они больше, тем меньше может быть другой, не менее (а, возможно и более) важный параметр, а, во-вторых, такое использование ресурса может быть нерационально. Вот именно в таком случае, нечеткая система позволит выбрать тот результат, который даст наилучшее значение для решения конкретной задачи.

Таким образом, в плохо структурируемых или плохо формализуемых системах нечеткая логика позволяет дать ровно ту вариативность, которая максимально эффективно позволяет подобрать параметры в формате «здесь и сейчас» и добиться оптимальной работы системы.

Из недостатков можно выделить усложнение алгоритмов, работающих в системе в целом. Действительно, процесс фазификации, дефазификации, выбора оптимальных параметров требует дополнительных расчетов, места хранения, итераций, а, значит увеличивается время работы и появляется необходимость выделения больших ресурсов. Однако, в случае сложных интеллектуальных систем это оправданная необходимость.

Еще одним направлением, включающим в себя нечеткую логику, являются мягкие вычисления – термин, который говорит о том, что в системе используется сочетание нескольких методологий, одной из которых является нечеткая логика. Примером можно привести сочетание с нейронными

сетями без которых, на данный момент, невозможно представить ни одну сферу, где функционируют интеллектуальные системы [3].

Итогом можно выделить, что принцип внедрения нечеткой логики в интеллектуальную систему сам по себе является нетривиальной задачей. Действительно, открытым остается вопрос внутренних алгоритмов, при выборе идеального решения, уместность использования в конкретной задаче, однако та вариативность, которая привносится в систему с его использованием позволяет значительно повысить гибкость принятия решений, а, значит сделать систему более эффективной.

Список используемых источников

1. Kozlova O. A., Kozlova L. P. Systems of intelligent information processing using fuzzy logic Mezhdunarodnaya konferenciya po myagkim vychisleniyam i izmereniyam (2024' SCM) [Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIconRus)]. Saint Petersburg, 2024, PP. 707-709 (In Russia). DOI: 10.1109/SCM62608.2024.10554227.
2. Kozlova O. A., Kozlova L. P. Useing of Fuzzy Algorithms in Intelligent Systems Mezhdunarodnaya konferenciya po myagkim vychisleniyam i izmereniyam (2023' SCM) [Conference on Soft Computing and Measurements (SCM'2023)]. Saint Petersburg, 2023, PP. 188-191 (In Russia). DOI: 10.1109/SCM58628.2023.10159059.
3. Kozlova Lyudmila P., Belov Aleksandr M., Kozlova Olga A. The Use of Neural Networks for Planning the Behavior of Complex Systems. Trudy konferencii rossijskih molodyh issledovatelej v oblasti elektrotekhniki i elektroniki (2018EIconRus) Proceedings of the 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical.

POSSIBILITIES OF APPLYING FUZZY LOGIC ALGORITHMS IN INTELLIGENT SYSTEMS

Kozlova L., Kozlova O., Rakovskii O.

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

The diversity of fuzzy algorithms in the modern world allows for the creation of concepts that can meet the most complex requirements and be applied in industrial and everyday tasks. This is especially relevant as more and more systems exhibit signs of intelligence. Creating a system that fully complies with the concept of artificial intelligence is a distinct challenge. This article will examine the basic principles of fuzzy system design, their advantages, disadvantages, and how to overcome them.

Key words: *fuzzy systems, technological process, degree of belonging, intellectualization*

УДК 004

ГРНТИ 28.01.75

AGILE-АРХИТЕКТУРА: БАЛАНС МЕЖДУ ЭВОЛЮЦИЕЙ И СТАБИЛЬНОСТЬЮ В ДОЛГОСРОЧНЫХ ПРОЕКТАХ

О. А. Козлова, Т. В. Матюхина, О.В. Раковский

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича

Методология гибкого проектирования Agile является подходом, при котором архитектура проекта не фиксируется в самом начале, а формируется интерактивно, параллельно с разработкой конечного продукта. Но в долгосрочных проектах, продолжительностью более 3 лет, появляются специфические проблемы, связанные с накоплением технических погрешностей, из-за чего частые изменения могут приводить к архитектурным разрушениям. Архитектура должна эволюционировать, но не случайным образом, а предсказуемо и контролируемо. Использование модульности и микросервисов позволяют формализовать границы изменений и сохранить целостность проекта.

управление ИТ-проектами, разработка информационных систем, разработка программного обеспечения, Agile, SCRUM, Kanban, DevOps, автоматизация разработки

Методология Agile характеризуется следующими качествами: адаптивность, постепенность, итеративность, бережливость, эмпиричность [1]. Архитектура проекта должна уметь меняться. Необходимо поддерживать инкрементальное проектирование и постепенное углубление архитектуры, ориентироваться на управляемые изменения, а не на статичный план, опираться на техническое совершенство и качество кода, чтобы система была «податлива» к изменениям.

В долгосрочных проектах (3–5+ лет) при проектировании появляются специфические проблемы.

- Накопление технических долгов. Частые изменения без архитектурной дисциплины приводят к излишнему усложнению систем.
- Рост сложности интеграций и сервисов. С увеличением числа команд и модулей возрастает риск разрушения всей архитектуры.
- Давление сроков. Заказчик часто требует быстрых обновлений продукта, но при этом необходимо сохранять стабильность.
- Agile-архитектура в долгосрочных проектах должна быть продуманной системой баланса: эволюция системы быть управляемой, а не хаотичной,

а стабильность – не жесткой, а «мягкой» и жизнеспособной. Такая архитектура позволила бы одновременно быстро отвечать на бизнес-изменения и сохранять целостность, надежность и масштабируемость продукта в течение многих лет [2].

Этого можно достичь следующими методами.

- Использовать инкрементальное проектирование. Базовую архитектуру определяют в начале, а детали и расширения уточняют по мере роста понимания требования и данных.
- Применять архитектурные проверки. Вводят автоматизированные правила, которые не позволяют системе выходить за границы устойчивой архитектуры.
- Использовать вехи эволюции. Выделяют определенные события (рост нагрузки, появление новых интеграций, смена бизнес-модели), которые запускают обсуждение и обновление архитектуры.
- Стабильность в Agile-архитектуре не означает отсутствие изменений. Но эти изменения должны быть предсказуемыми и контролируемыми. Основными механизмами для этого являются следующие.
- Модульность и декомпозиция. Применение компонентная или микросервисной архитектуры снижает риск, когда изменение в одном модуле срывает всю систему.
- Непрерывный рефакторинг и техническое совершенство. Регулярная работа над улучшением внутреннего качества кода и архитектуры.
- Автоматизированное тестирование и CI/CD. Каждый архитектурный шаг сопровождается тестами и деплоем, что позволяет быстро откатывать неправильные решения. Целью является вовремя поймать ошибки и уязвимости, пока они еще не успели разрастись и повлиять на другие части системы. Обычно проводят статический анализ кода, безопасности зависимостей и автоматические проверки стандартов оформления. Само развертывание можно запускать вручную – например, когда команда решит, что пора выпускать обновление, или включить автоматическое развертывание.

Обеспечить согласование эволюции и стабильности в Agile-архитектуре можно сочетая жесткие и гибкие правила, как представлено в таблице 1.

ТАБЛИЦА 1. Сочетание эволюционности и стабильности архитектуры проекта

Аспект	Эволюция (изменения)	Стабильность (ограничения)
Уровень проектирования	Инкрементальный рост архитектуры спринт за спринтом	«Архитектурные контракты» между модулями
Решения	Гибкость бэклога, пере-приоритизация под бизнес-требования	Технические ограничения (например, по интеграции, SLA, данным)
Ответственность	Команды самостоятельно принимают тактические решения	Архитектурный совет/ архитекторы задают стратегические рамки

Наибольшую популярность обрели две методики – Scrum и Kanban [3].

В методике Scrum (рис. 1) предполагается работа команды программистов, тестировщиков, аналитиков и т.д., совместно с владельцем продукта и scrum-мастером. Scrum-мастер отвечает за управление процессами компании в соответствии с идеями Agile (встречи, мотивация команды).

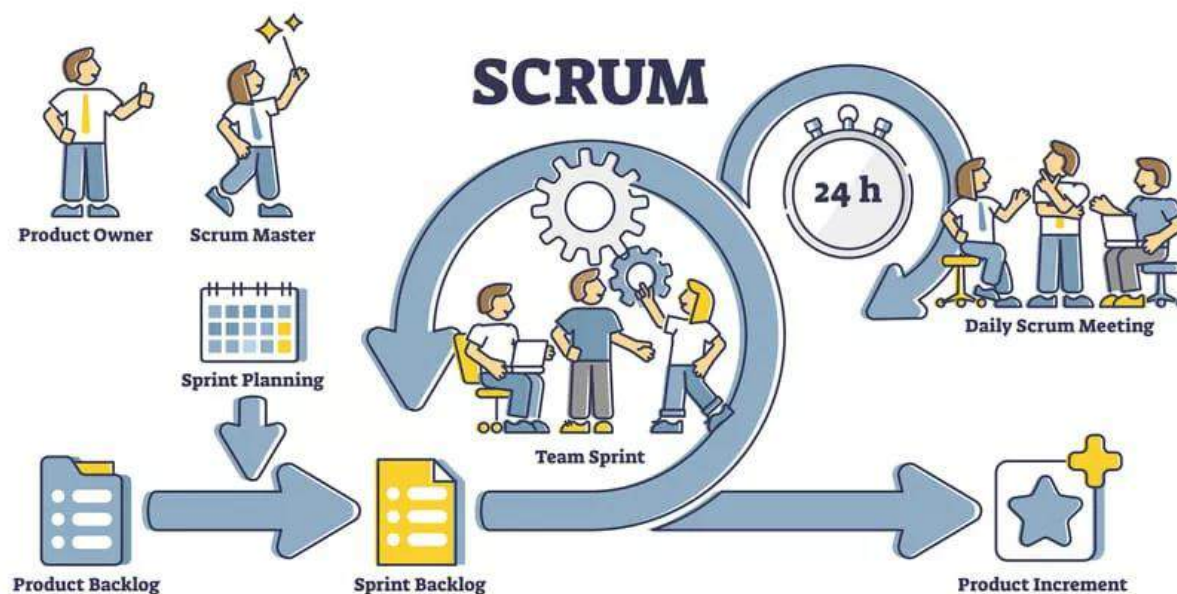


Рис. 1. Методика Scrum [3]

В методике Kanban отличие заключается в отсутствии владельца продукта и мастера. Вместо спринтов используются стадии выполнения задач. Условно весь процесс разделяется на этапы «Планирование», «Разработка», «Тестирование», «Завершено». Каждая стадия фиксируется на специальной канбан-доске, реальной или электронной.

Для целей масштабирования гибких (Agile) практик в крупных организациях служит методология SAFe (Scaled Agile Framework). Она предоставляет структурированное руководство по внедрению Agile-методов в мас-

штабе всей компании, обеспечивая согласованность, прозрачность и предсказуемость работы множества команд.

Рассмотрим опыт реализации долгосрочных проектов на примере российских компаний.

1. Сбербанк (масштабная цифровая платформа)

Сбербанк и Сбербанк-онлайн/Сбер-экосистема – классический пример долгосрочного Agile-архитектурного проекта. К Agile-трансформации банк приступил 14 сентября 2016 года. Уже к концу 2021 года количество продуктовых внедрений увеличилось более чем в 4 раза, при этом средний срок вывода продукта на рынок от идеи до реализации (time to market) сократился более чем в 7 раз [4]. Масштаб проектирования охватывает тысячи продуктовых команд, сотни сервисов, сотни Agile коучей, микросервисную архитектуру с многоуровневой интеграционной шиной. Архитектура развивается по различным направлениям, но при этом сохраняется базовая стабильность APIs и данных.

2. ЕСИА «Госуслуги»

Масштаб на 2023 год был более 100 продуктовых команд и более чем 2000 человек в производственном кластере, а также 13 офисов. Модульная архитектура портала имеет отдельные сервисы для аутентификации, обращений, платежей, ЕСИА. Используются событийная шина и декомпозиция через API контракты между командами. Новые услуги и изменения в законодательстве вводятся через инкременты, но базовые сервисы (авторизация, идентификация) остаются стабильными и регламентированными [5].

3. E-commerce / ритейл (X5, Ozon, крупные онлайн-магазины)

Крупные ритейлеры и онлайн-магазины десятилетиями развивают свои платформы магазинов, логистики, CRM и аналитики. Примерами могут послужить X5 Retail Group, Ozon, крупные международные retail-платформы. Из архитектурных решений можно отметить переход к микросервисам (карта-сервис, каталог, заказ, инвентарь, лояльность) и использование очередей и событий между сервисами, чтобы изменения в логистике или рекомендациях не ломали заказ.

4. Банк Альфа-Банк / ХоумКредит и др. (банковские платформы)

Крупные банки, включая Альфа-Банк и ХоумКредит, перешли к Agile масштабированию и SAFe моделям, где долгосрочные проекты кредитования и банковских услуг построены на гибкой архитектуре.

Основные выводы, которые сделала компания Хоум Кредит в результате внедрения долгосрочного планирования [6]:

- нужно понимать, что трансформация IT, тем более банковской сферы, – это не спринт, а марафон, требующий много терпения;
- SAFe позволяет сократить в крупных компаниях time to market в среднем на 15–20 %;
- вы получаете полезную методологию управления незавершенной работой;
- SAFe учит управлять большим количеством команд в формате единого целого;
- SAFe повышает вовлеченность сотрудников, улучшает коммуникации между командами
- SAFe обеспечивает прозрачность процессов, приоритетов и зависимостей;
- улучшаются инженерные практики и скорость доставки ценности или продукта для клиента без снижения их качества;
- SAFe улучшает контроль за инвестициями, за тем, насколько полезно будет то или иное предложение для бизнеса.

5. Крупные IT -продуктовые компании (Kaspersky, iiko, SaaS платформы)

Продуктовые компании, работающие в режиме SaaS (ПО находится в облаке, а не на компьютере), живут десятилетиями и развивают свои системы с помощью Agile -архитектуры. CEO сервиса автоматизации процессов предприятий общественного питания iiko Роман Аврамов сформулировал рекомендации, которые точно облегчат жизнь тем, кто решится внедрять SAFe самостоятельно» [7]:

- обучите ключевых сотрудников основам SAFe;
- выявите основное ограничение в текущем процессе разработки. Если команда проводит ретроспективу – ее результаты могут натолкнуть на нужные мысли, если нет – пройдите самостоятельную оценку по ScrumButt Test или подобной методике;
- выберите не больше пяти элементов SAFe, которые могут помочь преодолеть это ограничение, и внедрите именно их в ближайшей итерации;
- повторяйте пункты 2 и 3.

Кроме того, для успешного внедрения SAFe важны:

- корпоративная культура организации и внешняя среда, допускающие работу по Agile. Успешное внедрение SAFe вряд ли возможно, например, в «красных» организациях (по классификации Фредерика Лалу);
- четкая и понятная цель предстоящих изменений в процессах;
- мотивированная команда, которая осознает несовершенство текущей методики и готова активно участвовать в изменениях.

Любая команда от 10 человек, работающая по Agile, рано или поздно задумывается о том, как эту методологию можно масштабировать на команды большего размера. И SAFe в этой ситуации – один из лучших вариантов.

Список используемых источников

1. Agile: искусство гибкого управления проектами. URL: <https://q.diasoft.ru/media-center/publications/agile-iskusstvo-gibkogo-upravleniya-proektami/> (дата обращения: 07.05.2026).
2. Эволюционная архитектура на практике. URL: <https://system-design.space/chapter/evolutionary-architecture-practice/> (дата обращения: 07.05.2026).
3. Agile: суть, принципы, плюсы и минусы, особенности внедрения. URL: <https://gb.ru/blog/agile/> (дата обращения: 07.05.2026).
4. 5-летие Sbergile: итоги самой большой Agile-трансформации в мире. URL: <https://bankinform.ru/news/115794> (дата обращения: 07.05.2026).
5. Как SAFe помогает выполнять задачи государственной важности и иногда немного спать. URL: <https://communities.changeleaders.ru/enterprise-agile-russia/kak-safe-pomogaet-vypolnyat-zadachi-gosudarstvennoj-vazhnosti-i-inogda-nemnogo-spat/> (дата обращения: 07.05.2026).
6. Крупнейшая SAFe трансформация в России – Хоум Кредит Банк (2019). URL: <https://ionovpartners.ru/about/cases/homecreditbank/> (дата обращения: 07.05.2026).
7. Самостоятельное внедрение SAFe: 5 кейсов российского рынка. URL: <https://scrumtrek.ru/blog/enterprise-agility/2432/self-implementing-safe-cases/> (дата обращения: 07.05.2026).

AGILE ARCHITECTURE. BALANCING EVOLUTION AND STABILITY IN LONG-TERM PROJECTS

Kozlova O., Matyukhina T., Rakovskii O.

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

Agile is an approach in which the project architecture is not fixed at the outset, but rather is developed interactively, in parallel with the development of the final product. However, long-term projects lasting more than three years present unique challenges associated with the accumulation of technical errors, which can lead to frequent changes leading to architectural breakdowns. Architecture should evolve. Not randomly, but in a predictable and controlled manner. The use of modularity and microservices allows for formalizing change boundaries and maintaining project integrity.

Key words: IT project management, information systems development, software development, Agile, SCRUM, Kanban, DevOps, development automation

УДК 004.057.4

ГРНТИ 50.41.17

РЕАЛИЗАЦИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ BIOS/UEFI С ВМС ПО ПРОТОКОЛУ IPMI ДЛЯ НАСТРОЙКИ СЕТЕВЫХ ПАРАМЕТРОВ

У. А. Костельцева, О. Л. Неелова

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В статье рассматривается способ настройки IPv4-параметров базового контроллера управления платой ВМС из интерфейса BIOS/UEFI с использованием протокола IPMI. Описаны принципы обмена IPMI-сообщениями, структура команд чтения и записи сетевых параметров, а также прикладная реализация функций получения и установки IP-адреса, маски подсети, шлюза и режима DHCP. Показано, что передача параметров ВМС через BIOS/UEFI позволяет выполнять первичную сетевую конфигурацию контроллера до загрузки операционной системы. Предложенный подход позволяет автоматически настраивать сетевой интерфейс ВМС из BIOS, что упрощает интеграцию ВМС в существующую сеть и обеспечивает дистанционное управление сервером.

ВМС, IPMI, удаленное управление, BIOS, UEFI, IPv4, IPv6, сетевое конфигурирование

Введение

В современных серверных платформах базовый контроллер управления платой ВМС (Baseboard Management Controller) выполняет функции низкоуровневого мониторинга и управления, работая независимо от центрального процессора и операционной системы. Через ВМС администратор может получать данные о температуре, состоянии вентиляторов и питании, включать или выключать сервер, просматривать журналы событий и выполнять другие операции удаленного обслуживания [1, 2].

Как правило, ВМС имеет собственный сетевой стек и выделенный адрес IPv4 или IPv6. Его сетевые параметры могут задаваться через web-интерфейс контроллера, средствами операционной системы, либо непосредственно через BIOS/UEFI при первичной настройке сервера [1, 3]. Последний способ особенно полезен на этапе ввода оборудования в эксплуатацию, когда операционная система еще не установлена или сетевой доступ к ВМС не настроен.

Конкретный сетевой параметр выбирается с помощью поля Parameter Selector. Для IPv4 наиболее важны следующие идентификаторы: 0x04 – источник IP-адреса, 0x03 – IP-адрес BMC, 0x06 – маска подсети, 0x0C – шлюз по умолчанию [4]. Например, для перехода в режим DHCP BIOS отправляет команду Set LAN Configuration Parameters с параметром 0x04 и значением 0x02 [4]. При статической настройке дополнительно передаются четыре байта IP-адреса, маски и шлюза.

Реализация в BIOS: получение и задание параметров IPv4

Рассмотрим пример экранного интерфейса BIOS для конфигурации BMC (рис. 2)



Рис. 2. Пример экранного интерфейса BIOS для конфигурации BMC

В рассматриваемой реализации в прошивке BIOS/UEFI была создана отдельная страница настроек BMC, позволяющая отображать текущие сетевые параметры и изменять их. Взаимодействие с контроллером выполняется через IPMI-драйвер, предоставляющий низкоуровневую функцию IpmiSubmitCommand. Она принимает NetFn, Command, буфер данных запроса и буфер ответа, скрывая детали передачи сообщения через локальный системный интерфейс.

Чтение текущих параметров IPv4 ВМС

При открытии страницы настроек необходимо получить из ВМС текущий режим назначения адреса, IP-адрес, маску подсети и шлюз. Для этого реализована функция `GetBmcIPv4Config()`, которая последовательно отправляет команду `Get LAN Configuration Parameters` для каждого параметра [4]. Упрощенный фрагмент цикла чтения приведен ниже.

```
UINT8 Parameters[][2] = {
    { 0x04, 1 }, /* источник IP-адреса */
    { 0x03, 4 }, /* IP-адрес */
    { 0x06, 4 }, /* маска подсети */
    { 0x0C, 4 } /* шлюз по умолчанию */
};
for (int i = 0; i < 4; ++i) {
    RequestData[0] = 0x01; // LAN-канал 1
    RequestData[1] = Parameters[i][0];
    Status = IpmiSubmitCommand(0x0C, 0x02,
        RequestData, RequestDataSize,
        ResponseData, &ResponseDataSize);
    CopyMem(SettingsPointers[i], ResponseData + 2, Parameters[i][1]);
}
```

В первом байте запроса указывается номер LAN-канала, во втором – идентификатор требуемого параметра [4]. После выполнения команды ответ ВМС анализируется по коду завершения, а полезные данные копируются в локальную структуру настроек. В реализации также предусмотрены повторные попытки чтения при временной недоступности контроллера. Полученные значения преобразуются из бинарного представления в строковый формат и сохраняются в конфигурационной структуре BIOS, из которой формируются поля интерфейса.

Применение новых параметров

После изменения параметров пользователем и сохранения настроек BIOS вызывает функцию `SetBmcIprv4Config()`. Сначала из внутреннего хранилища считываются введенные значения IP-адреса, маски, шлюза и режима назначения адреса. Далее выполняется настройка источника IP-адреса: для DHCP передается значение `0x02`, для статической конфигурации – значение `0x01` [4]. Если выбран DHCP, дальнейшая передача адресов не требуется: ВМС самостоятельно получает сетевые параметры от DHCP-сервера.

При статической настройке введенные пользователем строки, например `L"192.168.1.100"`, преобразуются в бинарный формат из четырех байтов. При ошибке формата функция завершает работу с ошибочным стату-

сом, не отправляя некорректные параметры в BMC. После успешной проверки последовательно выполняются три вызова SetIpmiLanCmd: для параметра 0x03 (IP-адрес), 0x06 (маска подсети) и 0x0C (шлюз по умолчанию). Если любая из команд возвращает ошибку, дальнейшая отправка прерывается; при успешном выполнении всех команд новые настройки применяются контроллером.

Поддержка IPv6

Стандарт IPMI 2.0 предусматривает расширение сетевого управления для IPv6, однако практическая поддержка таких параметров зависит от конкретной реализации BMC [4]. Кроме того, многие административные сценарии по-прежнему ориентированы на IPv4. Поэтому в данной работе основной акцент сделан на IPv4-конфигурации, а поддержка IPv6 рассматривается как направление дальнейшего развития. С точки зрения архитектуры принцип остается тем же: BIOS формирует стандартные IPMI-запросы чтения и записи, но для IPv6 требуются более длинные поля адреса и дополнительные параметры, например длина префикса и шлюз.

Заключение

В работе показано, каким образом средства BIOS/UEFI могут использоваться для интеграции настройки сетевых параметров BMC с применением протокола IPMI. Реализованный механизм позволяет автоматически считывать текущую IPv4-конфигурацию контроллера и задавать новые значения путем отправки стандартных IPMI-команд. Такой подход упрощает первичную настройку сервера и позволяет выполнить конфигурирование BMC еще на этапе BIOS Setup, без отдельного подключения к web-интерфейсу контроллера или использования утилит операционной системы.

Практическая ценность решения состоит в сокращении времени развертывания серверного оборудования и повышении согласованности параметров: значения, отображаемые в BIOS, сразу передаются в BMC и применяются его сетевым стеком. В дальнейшем механизм может быть расширен за счет полноценной поддержки IPv6 и дополнительных параметров управления, однако уже базовая реализация повышает степень интеграции средств удаленного администрирования сервера.

Список используемых источников

1. Бесклубов С. В., Мотилов М. О. Исследование аппаратной технологии удаленного администрирования iKVM, предназначенной для автономного мониторинга и удаленного управления серверных платформ ASUS // Цифровые технологии обработки и защиты информации: сб. науч. ст. / под ред. Е. В. Стельмашонок, И. Н. Васильевой. СПб.: Изд-во СПбГЭУ, 2020. С. 15–25.
2. Frazelle J. Opening up the Baseboard Management Controller // Communications of the ACM. 2019. Vol. 17. N 5. PP. 5-12. DOI: 10.1145/3371595.3378404.
3. An J.-H., Kim Y., Park C. W. Design of Framework Supporting IPMI and DCMI Based on Open BMC // Proceedings of the International Conference on Research in Adaptive and Convergent Systems (RACS '17). Krakow, Poland, 2017. P. 298-299. DOI: 10.1145/3129676.3129706.
4. Intel Corporation, Hewlett-Packard Company. NEC Corporation, Dell Inc. Intelligent Platform Management Interface Specification. Second Generation, v2.0. Document Revision 1.1, E7 Markup. 2015. URL: <https://www.intel.com/content/dam/www/public/us/en/documents/specification-updates/ipmi-intelligent-platform-mgt-interface-spec-2nd-gen-v2-0-spec-update.pdf> (дата обращения: 17.07.2026).

Статья представлена кандидатом технических наук, доцентом кафедры ПИиВТ СПбГУТ А. В. Пачиным.

IMPLEMENTATION OF BIOS/UEFI INTERACTION WITH THE BMC VIA THE IPMI PROTOCOL FOR CONFIGURING NETWORK PARAMETERS

Kosteltseva U., Neelova O.

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

The paper considers a method for configuring IPv4 parameters of the Baseboard Management Controller (BMC) from the BIOS/UEFI interface using the IPMI protocol. The principles of IPMI message exchange, the structure of commands for reading and writing network parameters, and the application-level implementation of functions for obtaining and setting the IP address, subnet mask, gateway, and DHCP mode are described. It is shown that transferring BMC parameters through BIOS/UEFI makes it possible to perform the initial network configuration of the controller before the operating system is loaded. The proposed approach enables automatic configuration of the BMC network interface from BIOS, which simplifies BMC integration into an existing network and provides remote server management.

Key words: BMC, IPMI, remote management, BIOS, UEFI, IPv4, IPv6. Network configuration

УДК 004.052.32

ГРНТИ 28.17.31

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ IoT СИСТЕМ

Ф. П. Куракин, А. В. Пачин

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В статье проведен анализ методов построения цифровых двойников IoT-систем. Рассмотрены методы сбора данных, методы передачи данных, методы хранения и метод жизненного цикла разработки. Показано, что выбор конкретных методов определяется составом IoT-устройств и решаемыми задачами, а универсального подхода не существует. Результаты могут быть использованы при проектировании цифровых двойников для систем «умного дома».

цифровой двойник, интернет вещей (IoT), методы сбора данных, методы передачи данных, жизненный цикл разработки, идентификация устройств

В условиях цифровой трансформации промышленности (Индустрия 4.0) и необходимости импортозамещения высокотехнологичной продукции технология цифровых двойников становится ключевым инструментом повышения конкурентоспособности принципиально новых изделий. Согласно ГОСТ «Цифровые двойники изделий» [1] цифровой двойник – сущность, объединяющая различные математические и компьютерные модели в единую систему. Однако, процесс создания цифровых двойников сопряжен с высокой стоимостью, необходимостью интеграции разнородных данных и отсутствием унифицированных методов их построения для различных отраслей.

Целью статьи является повышение эффективности построения цифровых двойников IoT систем.

Задачей статьи является систематизация и сравнительный анализ методов построения цифровых двойников IoT систем.

Методы сбора данных в IoT-системах

Сбор данных является первым и критическим этапом построения цифрового двойника IoT-системы. Именно через датчики и сенсоры физический объект (например, здание, станок, транспортное средство) передает свое те-

кущее состояние в виртуальную среду. Качество и своевременность данных напрямую определяют адекватность цифрового двойника [2]. В данной главе рассмотрены методы опроса датчиков и идентификации устройств.

Методы опроса датчиков

Можно выделить 2 основных вида опроса датчиков IoT системы, для получения информации о них цифровым двойником [3]:

- периодический опрос – датчик передает показания через фиксированные интервалы времени;
- опрос по событию – датчик передает данные только при наступлении какого-либо события.

Сравнительный анализ данных методов приведен в таблице 1.

ТАБЛИЦА 1. Сравнение методов опроса датчика

Параметр	Периодический	Событийный
Частота передачи	С фиксированным интервалом времени	По наступлению определенного события
Риск пропуска события	Средний, в случае если интервал времени большой	Низкий, при правильной настройке
Нагрузка на сеть	Постоянная, предсказуемая	Переменная, пики при событиях
Сложность реализации	Низкая	Средняя, так как требует детальной настройки

Сравнивая, предложенные методы по данным параметрам, можно выделить 3 метод опроса датчика – гибридный, который объединит периодический и событийный методы.

Методы идентификации устройств

Для корректного сопоставления данных, полученных с IoT устройств, необходимо однозначно идентифицировать каждое устройство.

Можно выделить 2 основных способа идентификации устройств:

- Аппаратная идентификация. Используются уникальные идентификаторы, встроенные в IoT устройства (например, MAC адрес).
- Логическая идентификация. Устройству при подключении к сети, устанавливается уникальный идентификатор, чаще всего в человек читаемом виде.

Рассмотрим достоинства и недостатки каждого из представленных методов в таблице 2.

ТАБЛИЦА 2. Сравнение методов идентификации устройств

Метод идентификации	Достоинства	Недостатки
Аппаратная	Неизменность, так как чаще всего устанавливаются производителем	Не имеет смысловой нагрузки, в связи с чем, возникнут сложности в определение устройства
Логическая	Удобство для понимания к какому устройству принадлежит	Требует начальной настройки, при подключении нового устройства

Стоит отметить, что у обоих методов имеется общий недостаток подделки устройств.

Также, можно выделить 3, комбинированный способ идентификации устройств, который будет объединять аппаратное и логическое определение устройств.

Методы передачи данных

После сбора данных с датчиков возникает задача их надежной и своевременной передачи к цифровому двойнику или к промежуточному звену, а в дальнейшем к цифровому двойнику. Выбор методов и протоколов передачи данных влияет на энергопотребление устройств, пропускную способность сети, задержки и общую надежность IoT-системы [3].

Для IoT устройств характерны ограниченные вычислительные ресурсы, в связи с чем, традиционные протоколы, такие как HTTP, становятся избыточными [3, 4].

Рассмотрим протоколы, которые используются при условии, что IoT устройство выходит напрямую в интернет.

- MQTT – основан на методах публикации/подписок (брокер сообщений);
- CoAP – основан по образу HTTP, и обеспечивает получение данных по модели запрос-ответ;
- AMQP – предоставляет возможность маршрутизации запросов, очередей, транзакций, однако, по сравнению с протоколами, указанными выше, является более тяжелым для вычислений.

Сравнение данных протоколов по характеристикам эффективности, показана в таблице 3.

ТАБЛИЦА 3. Сравнение протоколов передачи данных от IoT устройства к цифровому двойнику

Характеристика	MQTT	CoAP	AMQP
Модель	Публикация/ подписка	Запрос- ответ	Очереди, маршрутизация
Размер заголовка, байт	2	4	От 8
QoS	Да (3 уровня)	Нет	Да
Применимость для батарейных датчиков	Высокая	Высокая	Средняя

Также стоит выделить технологии, которые работают в локальной сети и передают данные до промежуточного звена, например хаба. К таким технологиям относятся:

- Zigbee;
- Bluetooth LE;
- Wi-Fi.

Каждый из этих протоколов имеет различные характеристики, сравнительная характеристика их указана в таблице 4.

ТАБЛИЦА 4. Сравнение локальных технологий передачи данных IoT сети

Технология	Дальность	Скорость	Энергопотребление	Возможное применение
Zigbee	10-100 м	250 кбит/с	Очень низкое	Датчики, лампы, розетки
Bluetooth LE	10-30 м, при условии открытого пространства без препятствий	1 Мбит/с	Низкое	Трекеры, пульты
Wi-Fi	30-100 м	От 100 Мбит/с	Высокое	Камеры

Методы хранения данных

Собранные и переданные по сети данные должны быть сохранены для последующего анализа, визуализации и формирования истории состояний объекта. Выбор метода хранения влияет на скорость доступа, масштабируемость, возможность обработки временных рядов и сложность интеграции с другими компонентами цифрового двойника.

Можно выделить следующие виды, хранения данных [4, 5]:

- реляционные базы данных – хранение данных в табличной форме;
- графовые базы данных – хранение данных в виде графов, применяются для создания логических связей между объектами, например, связь комнат в умном доме.
- базы данных временных рядов – хранение данных, которые содержат метку времени, в отличие реляционных баз данных, специализируются именно на работе с объектами, содержащими временные ряды.

Области использования каждого из представленных методов, указаны в таблице 5.

ТАБЛИЦА 5. Сравнение методов хранения данных (составлена автором)

Метод хранения	Виды данных	Область применения в цифровых двойниках IoT систем
Реляционные БД	Структурированные метаданные, справочники, конфигурации, транзакционные журналы	Управление устройствами, пользователями, правами доступа, сценариями; логирование редких событий (подключение/отключение устройств, настройки шлюзов)
Графовые БД	Связи, онтологии, сетевые топологии	Моделирование взаимосвязей между объектами IoT (датчики, актуаторы, шлюзы, зоны покрытия); анализ маршрутов распространения сигнала или данных; семантический поиск
БД временных рядов	Потоки телеметрии с меткой времени	Сбор и анализ непрерывных показаний датчиков (температура, давление, вибрация, ток, частота); мониторинг производительности; прогнозирование отказов по трендам

Заключение

В рамках данной статьи был проведен анализ ключевых методов построения цифровых двойников IoT-систем: методов сбора данных, методов передачи данных, методов визуализации, методов хранения, а также метода жизненного цикла разработки. Однако следует отметить, что представленный перечень не является исчерпывающим.

При построении цифрового двойника конкретной IoT-системы невозможно использовать единый универсальный набор методов, выбор которых должен определяться ключевыми факторами, то есть составом и характеристиками входящих в систему устройств, а также набором задач, которые должен решать цифровой двойник.

Следует отметить, что при правильно подобранных методах сбора, передачи и хранения данных цифровой двойник со временем теряет свою точ-

ность. Связано с явлением дрейфа моделей, то есть постепенным расхождением между поведением физического объекта и его виртуальной копией, вызванным старением компонентов, износом оборудования, дрейфом чувствительности датчиков или изменением внешних условий. В связи с этим появляется необходимость разработки адаптивных цифровых двойников, главной отличительной чертой которых является автоматическое подстраивание своих параметров под изменяющееся состояние физической системы.

Список используемых источников

1. ГОСТ Р 57700.37-2021. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий: национальный стандарт Российской Федерации: издание официальное: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 16 сентября 2021 г. № 979-ст: дата введения 2022-01-01. Москва: Российский институт стандартизации, 2021. 15 с.
2. Нафиков А. М., Стучилин В. В. Методы и технологии разработки цифровых двойников для систем промышленного Интернета вещей // ИВД. 2025. №9 (129). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metody-i-tehnologii-razrabotki-tsifrovyyh-dvoynikov-dlya-sistem-promyshlennogo-interneta-veschey> (дата обращения: 11.04.2026).
3. Shiboldenkov V. A. The digital shadow and twin feasibility representation model for the radically new products competitiveness / V. A. Shiboldenkov, S. V. Nazyuta, A. A. Chursin // RUDN Journal of Economics. 2025. Vol. 33. N 3. P. 382-403. DOI 10.22363/2313-2329-2025-33-3-382-403. EDN DTSRDF.
4. Юсупова Н. И. Модели и методы анализа свойств информационных объектов при построении цифровых двойников / Н. И. Юсупова, В. В. Антонов, О. Н. Сметанина. Уфа: Уфимский государственный авиационный технический университет Издательство "Инновационное машиностроение", 2021. 123 с. ISBN 978-5-907523-02-9. EDN KHLATU.
5. Саржигитов Э. Т. Цифровые двойники и системы автоматизации в управлении нефтегазовым оборудованием / Э. Т. Саржигитов // Донбасс будущего глазами молодых ученых: Сборник материалов научно-технической конференции для студентов, аспирантов и молодых ученых, Донецк, 18 ноября 2025 года. Донецк: Донецкий национальный технический университет, 2025. С. 94-97. EDN NXEFTE.

ANALYSIS OF METHODS FOR CONSTRUCTING DIGITAL TWINS OF IOT SYSTEMS

Kurakin F., Pachin A.

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

The article analyzes methods for constructing digital twins of IoT systems. Methods of data collection, data transmission, data storage, and the development lifecycle method are considered. It is shown that the choice of specific methods is determined by the composition of IoT devices and the tasks to be solved, and that there is no universal approach. The results can be used in the design of digital twins for smart home systems.

Key words: digital twin, Internet of Things (IoT), data collection methods, data transmission methods, development lifecycle, device identification

УДК 004.89
ГРНТИ 28.23.29

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО КОНСПЕКТИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ АВТОМАТИЧЕСКОГО РАСПОЗНАВАНИЯ РЕЧИ И ЯЗЫКОВЫХ МОДЕЛЕЙ

М. А. Кутев, Д. С. Левшун

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В работе выполнены проектирование, реализация и исследование системы интеллектуального конспектирования, предназначенной для получения структурированных конспектов из устной речи. Система преобразует аудиозапись в текст, выполняет его очистку и разбиение на фрагменты, после чего формирует краткий и связный конспект с сохранением ключевых смыслов. Реализован прототип настольного приложения с возможностью редактирования результата и экспорта готового материала. Проведена оценка качества распознавания речи и качества итогового конспекта по автоматическим метрикам.

интеллектуальное конспектирование, автоматическое распознавание речи, большие языковые модели, суммаризация текста, оценка качества

В условиях цифровизации образовательного процесса объем информации, с которым ежедневно работают обучающиеся, существенно возрастает. Традиционные способы конспектирования, основанные на ручной записи, зачастую не обеспечивают достаточной полноты фиксации материала при высокой плотности учебного потока [1]. В то же время использование обычных аудиозаписей не решает задачу эффективной обработки данных, так как требует значительных временных затрат на повторное прослушивание для выделения ключевых тезисов [2].

Современные цифровые инструменты на базе искусственного интеллекта (Otter.ai, Fireflies.ai и др.) автоматизируют распознавание речи и суммаризацию текстов [3]. Однако большинство решений функционирует в облачной среде, что создает ограничения, связанные с зависимостью от интернет-инфраструктуры, рисками информационной безопасности и затрудняет их применение в закрытых средах с повышенными требованиями к защите данных [4].

Цель работы – разработка и исследование алгоритма интеллектуального конспектирования устной речи на основе автоматического распознавания речи и языковых моделей с последующей оценкой качества транскрипции и суммаризации.

Современные методы автоматического распознавания речи основаны на нейросетевых моделях, обеспечивающих преобразование аудиосигнала

в текст с учетом акустических, фонетических и контекстных особенностей речи, а также вероятностных закономерностей языка. Качество распознавания зависит от характеристик исходной аудиозаписи, уровня фонового шума, темпа и разборчивости речи, особенностей произношения говорящего, а также от архитектуры и размера используемой модели.

Большие языковые модели – это нейросетевые модели, обученные на больших массивах текстов и способные выделять ключевые идеи, обобщать и структурировать информацию. Качество результата зависит от качества транскрипции, корректности сегментации текста и настроек генерации, поскольку при чрезмерном сжатии возможны потери деталей и смысловые искажения.

Связка автоматического распознавания речи и большой языковой модели позволяет реализовать конвейер интеллектуального конспектирования: распознавание речи, постобработку текста и его преобразование в структурированный конспект. Такой подход автоматизирует фиксацию учебного материала, снижает трудозатраты на повторное прослушивание и сохраняет возможность локального развертывания.

На вход системы может поступать как аудиопоток в реальном времени, так и заранее записанный аудиофайл. В первом случае используется потоковая обработка с последовательной передачей сегментов между модулями, во втором – поэтапная обработка записи с сохранением временной структуры.

Первичный уровень обработки включает модуль (Voice Activity Detection, VAD), выделяющий речевые сегменты и отбрасывающий паузы и неречевые фрагменты. Далее речь разбивается на аудиочанки фиксированной длины, что обеспечивает стабильную работу модуля распознавания.

Затем выполняется автоматическое распознавание речи с формированием текстового представления аудиосегментов. Полученный текст проходит постобработку, включающую коррекцию пунктуации, устранение артефактов распознавания и нормализацию текста.

На заключительном этапе локально развернутая языковая модель преобразует распознанный текст в краткий структурированный конспект с сохранением ключевой информации.

Общая блок-схема архитектуры алгоритмической модели интеллектуального конспектирования представлена на рис. 1.

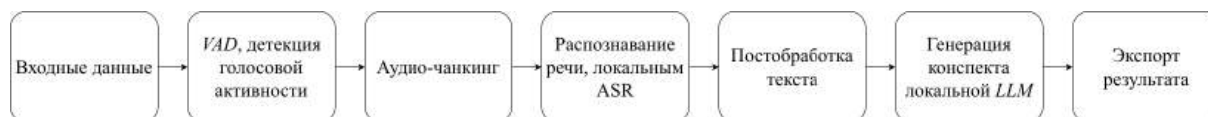


Рис. 1. Блок-схема архитектуры алгоритмической модели интеллектуального конспектирования

Для оценки качества системы использовались два поднабора собственного тестового набора данных: лекционные аудиофрагменты для оценки

ASR и текстовые отрывки из книг для оценки LLM-суммаризации. Всего в исследование включено 40 документов: 20 лекций и 20 книг. Суммарная длительность аудио составила 1,35 ч, общий объем текстового корпуса – 21 043 слова и 165 173 символа. Средний объем одного документа составил 526,08 слова; для лекционного поднабора – 461,75 слова, для текстового – 590,40 слова. Для ASR-поднабора (Automatic Speech Recognition) дополнительно учитывалось тематическое распределение аудиозаписей, тогда как для LLM-поднабора (Large Language Model) тематическая разбивка не использовалась.

Для эксперимента были выбраны две модели семейства Whisper: Whisper Base и Whisper Large-v2. Качество распознавания оценивалось с помощью метрик WER (Word Error Rate), отражающей долю ошибок распознавания, и WIP (Word Information Preserved) [5], характеризующей долю сохраненной информации. Эксперименты проводились на персональном компьютере со следующими характеристиками: процессор AMD (Advanced Micro Devices) Ryzen 5 3600x и 16 Гб оперативной памяти DDR4 (Double Data Rate). Результаты представлены в таблице 1.

ТАБЛИЦА 1. Результаты оценки качества распознавания лекционных аудиофрагментов моделями Whisper Large-v2 и Whisper Base на собственном датасете

Тема	n	Whisper Large-v2		Whisper Base	
		WER %, Me(Q1-Q3)	WIP %, Me(Q1-Q3)	WER %, Me(Q1-Q3)	WIP %, Me(Q1-Q3)
Информационные технологии	5	4,80 (3,93–5,36)	91,30 (90,69–92,92)	19,72 (18,35–20,25)	69,53 (68,04–70,31)
Физика	5	12,29 (8,35–16,61)	81,33 (79,10–89,25)	21,51 (19,91–24,13)	67,49 (62,84–69,27)
Медицина	5	12,45 (12,09–19,12)	80,74 (74,43–81,52)	26,20 (24,30–28,34)	59,36 (56,74–62,40)
История	5	8,41 (7,91–9,39)	85,57 (84,40–87,00)	18,43 (14,51–24,11)	68,36 (61,81–76,33)
Итог	20	10,13 (6,23–13,49)	84,33 (80,30–90,71)	20,88 (18,40–26,74)	67,7 (58,76–70,67)

Исходя из полученных данных, модель Whisper Large-v2 стабильно превосходит Whisper Base по всем исследуемым тематикам. Для Whisper Large-v2 характерны более низкие значения WER и более высокие значения WIP, что свидетельствует о меньшем количестве ошибок распознавания

и лучшем сохранении исходной информации. В целом по датасету медианное значение WER для Whisper Large-v2 составило 10,13 %, тогда как для Whisper Base – 20,88 %; медианное значение WIP составило 84,33 % и 67,7 % соответственно. При этом повышение качества распознавания при использовании Whisper Large-v2 сопровождается ростом потребления оперативной памяти: при сопоставимой медианной загрузке CPU (Central Processing Unit) (32,6 % для обеих моделей) медианное потребление RAM (Random-Access Memory) составило 2453,6 МБ для Whisper Large-v2 против 618,4 МБ для Whisper Base. Полученные результаты показывают, что Whisper Large-v2 обеспечивает более точное распознавание лекционной речи, однако требует существенно большего объема оперативной памяти.

В таблице 2 представлены результаты оценки качества суммаризации текстовых фрагментов двумя локальными LLM (Large Language Model) – minstral-3:3b и qwen2.5:3b. Сравнение проводилось по метрикам ROUGE-1, ROUGE-L (Recall-Oriented Understudy for Gisting Evaluation) [6] и CR (Compression Rate): метрики ROUGE отражают степень сохранения содержательных элементов исходного текста, а CR характеризует степень сжатия материала.

ТАБЛИЦА 2. Результаты оценки качества суммаризации текстовых отрывков локальной языковой моделью

Критерий	minstral-3:3b	qwen2.5:3b
ROUGE-1 %, Me (Q1-Q3)	47,43 (45,38 – 49,39)	41,42 (37,92 – 44,26)
ROUGE-L %, Me (Q1-Q3)	27,59 (25,62 – 30,00)	26,02 (23,94 – 28,86)
CR, Me (Q1-Q3)	1,52 (1,02 – 1,95)	2,37 (1,81 – 3,12)

Результаты, представленные в таблице 2, показывают, что модель minstral-3:3b обеспечивает более высокое качество суммаризации по сравнению с qwen2.5:3b. Это видно по более высоким медианным значениям по метрике ROUGE-1 и ROUGE-L, что подтверждает гипотезу о лучшем сохранении ключевых слов и смысловых связей с исходным текстом. Так, мо-

дель minstral-3-3:b точнее передает основной смысл фрагментов и генерирует конспекты более близкие к эталону.

Модель qwen2.5:3b показала более высокий результат в коэффициенте сжатия, то есть формировала более емкие тексты. Однако, увеличение степени сжатия привело к снижениям значений ROUGE, что демонстрирует потерю значимых смысловых фрагментов. Это позволяет сделать вывод о зависимости агрессивности сокращения текста и полнотой сохранения его содержания.

Стоит заметить, что значения ROUGE-L находятся на умеренном уровне, что можно объяснить особенностью задачи. Суммаризация учебных текстов не является задачей дословного копирования фрагментов текста, а направлена на сохранение смысла, так итоговый конспект может правильно передавать содержание исходного текста, но использовать иные формулировки, чем эталонный текст, что снижает показатели ROUGE.

В результате работы была разработана система интеллектуального конспектирования, которая включает в себя модуль распознавания речи и модуль суммаризации текста. Проведено сравнение моделей ASR и LLM на собственном наборе данных. Полученные результаты продемонстрировали, что такой подход позволяет генерировать учебные конспекты с приемлемым качеством транскрибации текста и сохранением основного смыслового содержания при сжатии. Данная работа подтверждает целесообразность использования ASR и LLM-моделей для автоматизации процесса суммаризации текста и перспективность дальнейшего развития системы.

Список используемых источников

1. Kiewra K. A., Colliot T., Lu J. Note This: How to Improve Student Note Taking // IDEA Paper. 2018. N 73. PP. 2–3. URL: https://www.researchgate.net/publication/330599365_Note_This_How_to_Improve_Student_Note_Taking (дата обращения: 09.06.2026)
2. Voelkel S., Bates A., Gleave T. [et al.]. Lecture capture affects student learning behaviour // FEBS Open Bio. 2023. Vol. 13. N 2. PP. 217–232. DOI: 10.1002/2211-5463.13548.
3. Tasker R. Otter vs. Fireflies: Which AI Meeting Tool Is Better? // Otter.ai. 2025. URL: <https://otter.ai/blog/otter-vs-fireflies-which-ai-meeting-tool-is-better> (дата обращения: 06.03.2026).
4. Левшун Д. С., Чечулин А. А., Котенко И. В. Жизненный цикл разработки защищенных систем на основе встроенных устройств // Защита информации. Инсайд. 2017. №. 4. С. 53–59.
5. Morris A. C., Maier V., Green P. From WER and RIL to MER and WIL: improved evaluation measures for connected speech recognition // Proceedings of Interspeech 2004. 2004. P. 2765–2768. DOI: 10.21437/Interspeech. 2004. P. 668.

6. Lin C.-Y. ROUGE: A package for automatic evaluation of summaries // Proceedings of the ACL Workshop: Text Summarization Branches Out. 2004. PP. 74-81. URL: <https://aclanthology.org/W04-1013.pdf> (дата обращения: 09.06.2026)

DEVELOPMENT OF AN INTELLIGENT NOTE-TAKING SYSTEM BASED ON AUTOMATIC SPEECH RECOGNITION AND LANGUAGE MODELS

Kutep M., Levshun D.

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

This paper presents the design, implementation, and evaluation of an intelligent note-taking system intended for generating structured summaries from spoken input. The system converts audio recordings into text, performs text normalization and segmentation, and then generates a concise and coherent summary while preserving the key semantic content. A prototype desktop application was developed with functionality for editing the generated output and exporting the final material. The quality of speech recognition and the resulting summaries was assessed using formal metrics.

Key words: intelligent note-taking, automatic speech recognition, large language models, text summarization, quality evaluation

УДК 004.85:004.6

ГРНТИ 20.23.19

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ РАЗМЕТКИ, ПРОФИЛИРОВАНИЯ И ВАЛИДАЦИИ ДАННЫХ В ЭКОСИСТЕМЕ R: МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ

Р. Я. Лабковская

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

*В статье исследуются методологические и программные аспекты обеспечения качества данных на этапах разметки, профилирования и валидации в экосистеме языка R. Актуальность обусловлена высокой долей неудачных ML-проектов из-за низкого качества исходных данных. Разработана комплексная архитектура воспроизводимого пайплайна, интегрирующая инструменты *labelmachine*, *safeframe*, *validate*, *pointblank* и *assertr*. Экспериментальная верификация проведена на наборах данных медицинской диагностики и промышленного мониторинга АЗС. Полученные результаты демонстрируют повышение точности моделей на 18–24 % и снижение ошибок валидации на 67 %. Сформулированы фундаментальные принципы семантической целостности и декларативного контроля, обеспечивающие соответствие стандартам ISO/TS 8000-81 и ГОСТ Р 71487.7.*

качество данных, разметка данных, профилирование, валидация, экосистема R, машинное обучение, воспроизводимость, пайплайны обработки данных

Введение

Согласно аналитике Gartner, низкое качество данных обходится организациям в среднем в \$12,9 млн ежегодно, а подавляющее большинство проектов в области Data Science не достигает стадии промышленной эксплуатации [1]. Ключевой причиной выступает отсутствие системного подхода к подготовке, описанию и контролю данных. Целью настоящей работы является экспериментальная верификация комплексной методологии, объединяющей процессы семантической разметки, статистического профилирования и декларативной валидации в экосистеме R. Научная новизна заключается в формализации критериев выбора пакетов, доказательстве синергетического эффекта их совместного применения и выведении фундаментальных закономерностей обеспечения надежности аналитических систем.

1. Методологические основы и инструментарий экосистемы R [1]

Качество данных рассматривается как трехкомпонентная модель:

- Семантический слой (разметка): присвоение смысловых меток, обеспечивающих интерпретируемость для моделей с учителем. Реализуется через *labelmachine* (управление словарями меток в YAML) и *safeframe* (привязка метаданных к колонкам *data.frame*).
- Структурный слой (профилирование): систематический анализ распределений, пропусков, аномалий и взаимосвязей. Инструменты: *spicy*, *summarytools*, *skimr*, *DataExplorer*.
- Нормативный слой (валидация): проверка соответствия бизнес-правилам и доменным ограничениям. Инструменты: *validate*, *pointblank*, *assertr*, *dataclass*.

Данная модель коррелирует с международными стандартами ISO/TS 8000-81:2021 и ГОСТ Р 71487.7-2024, определяющими профилирование и валидацию как обязательные практики управления качеством [2,3].

2. Экспериментальная реализация и архитектура пайплайна

Эксперимент проводился на двух репрезентативных наборах данных:

- медицинская диагностика: 15 000 рентгенографических снимков с аннотациями патологий (рак, туберкулез);
- промышленный мониторинг: видео- и телеметрические данные с 42 АЗС (очереди, работа персонала, трафик).

Для каждого набора реализованы три ветви: базовая (без контроля качества), частичная (один инструмент из трех этапов) и комплексная (полная методология). Архитектура пайплайна построена на пакетах *targets* и *renv*, что гарантирует воспроизводимость окружения и автоматический запуск проверок при обновлении данных (CI/CD):

```
1 library(targets)
2 library(renv)
3 tar_option_set(packages = c("tidyverse", "validate", "pointblank"))
4 pipeline <- list(
5   tar_target(raw, read_csv("data/raw.csv")),
6   tar_target(annotated, lama_translate(raw, dict_yaml)),
7   tar_target(profiled, profile_data(annotated)),
8   tar_target(validated, validate_data(profiled)),
9   tar_target(model, train_model(validated))
10 )
```

Рис. 1. Архитектура воспроизводимого пайплайна обработки данных в экосистеме R

На рис. 1 видно, что поток данных включает пять последовательных этапов: (1) загрузка сырых данных (*raw*); (2) семантическая разметка с применением словарей *labelmachine*; (3) профилирование и анализ распределений через *skimr/visdat*; (4) декларативная валидация по правилам *validate/pointblank*; (5) обучение модели машинного обучения [4]. Каждый этап сопровождается автоматическим логированием и генерацией отчетов в формате RMarkdown/Quarto.

На этапе валидации использовались декларативные правила контроля качества данных:

```
13 rules <- validate::validator(age >= 0 & age <= 120,  
14                               gender %in% c("M", "F"),  
15                               grep("\\^[^@]+@[^@]+\\.\\.[^@]+$", email))  
16 res   <- validate::confront(df_profiled, rules)
```

Рис. 2. Пример декларативных правил валидации данных с использованием пакета *validate*

Фрагмент кода, представленный на рис. 2, демонстрирует синтаксис описания бизнес-правил, применяемых для проверки корректности данных. Правила были сгруппированы по трем основным категориям: (1) контроль диапазонов допустимых значений (например, `age >= 0 & age <= 120`); (2) проверка принадлежности значения заданному множеству (`gender %in% c("M", "F")`); (3) валидация формата строковых полей с использованием регулярных выражений, в частности проверка корректности адресов электронной почты.

Применение функции *confront()* обеспечивает автоматическое сопоставление каждого объекта набора данных с заданным набором правил и формирование структурированного отчета о выявленных нарушениях. Такой подход позволяет преобразовать валидацию из разовой ручной процедуры в непрерывный, воспроизводимый и документируемый процесс контроля качества данных.

Для оценки практической эффективности предложенной методологии был проведен анализ ее влияния на качество моделей машинного обучения. Результаты данного анализа представлены в таблице 1.

ТАБЛИЦА 1. Влияние методологии на метрики качества моделей

Ветвь эксперимента	F1-score (медицина)	F1-score (АЗС)	Ошибки валидации	Время пайплайна, мин
Базовая	0.71	0.68	234	12.3
Частичная (разметка)	0.79	0.74	189	14.1
Частичная (профилирование)	0.82	0.77	156	15.8
Частичная (валидация)	0.84	0.79	98	16.2
Комплексная	0.94	0.91	77	18.5

Таблица 1 отражает результаты сравнительного эксперимента, проведенного на двух предметных областях: медицинской диагностике и промышленном мониторинге АЗС. Для каждой из пяти экспериментальных ветвей представлены метрика точности классификации (F1-score), абсолютное количество ошибок валидации на 10^4 записей и время выполнения полного пайплайна. Анализ данных демонстрирует монотонный рост качества модели при последовательном внедрении компонентов методологии: семантическая разметка повышает согласованность признаков (коэффициент Коэна k увеличился с 0.62 до 0.87, ошибки интерпретации сократились на 43 %), систематическое профилирование минимизирует влияние аномалий (выявлено и обработано 127 аномальных записей, или 0,84 % датасета), а декларативная валидация позволила сократить количество нарушений бизнес-правил на 67 % и обеспечить автоматическое формирование интерактивных HTML-отчетов в среде *pointblank*. Комплексное применение всех трех этапов предложенной методологии обеспечило статистически значимое повышение точности моделей на 18–24 % по сравнению с базовым конвейером обработки данных ($p < 0,01$; t-критерий Стьюдента). При этом увеличение вычислительных затрат оказалось умеренным и составило около 50 % дополнительного времени обработки. Полученные результаты свидетельствуют о высокой практической эффективности и целесообразности внедрения предложенного подхода в процессы подготовки и анализа данных.

3. Выводы

На основе экспериментальных данных сформулированы следующие теоретические положения:

- принцип семантической целостности: качество данных определяется не только статистическими характеристиками, но и сохранением смыслового контекста на всех этапах трансформации. Инструменты привязки метаданных к переменным (*safe frame*) являются необходимым условием математической воспроизводимости аналитических исследований;
- закон убывающей отдачи профилирования: существует оптимальная глубина анализа, при которой прирост информативности компенсирует вычислительные затраты. Для задач классификации оптимум достигается при комбинации *skimr* + *visdat*, выявляющей 95 % аномалий при 40 % времени обработки относительно полного набора;
- теорема о декларативной валидации: формализация бизнес-правил в виде спецификаций трансформирует валидацию из эпизодической процедуры в непрерывный процесс контроля. Это обеспечивает профилактику ошибок на ранних этапах и снижает техническую задолженность аналитических систем;
- мета-принцип воспроизводимости: любая методология контроля качества должна быть реализована в среде, гарантирующей детерминированность вычислений (*renv* + *targets* + *Quarto*). Без верифицируемости независимыми исследователями алгоритмы контроля теряют научную ценность.

Заключение

Экспериментальное исследование подтвердило эффективность комплексной методологии обеспечения качества данных в экосистеме R. Системное применение инструментов разметки, профилирования и валидации позволяет повысить точность ML-моделей, снизить операционные риски и обеспечить соответствие международным стандартам. Практическая значимость заключается в разработке готовых шаблонов пайплайнов, адаптируемых под различные предметные области. Перспективы исследований связаны с расширением методологии на задачи потоковой обработки данных и интеграцией с инструментами объяснимого ИИ (XAI, Explainable AI).

Список используемых источников

1. Лабковская Р. Я. Анализ больших данных / Р. Я. Лабковская, П. В. Косов. СПб: СПбГУТ, 2025. – 152 с.
2. ISO/TS 8000-81:2021. Data quality – Part 81: Data profiling: concepts, processes and metrics. Geneva: ISO, 2021. 42 p.
3. ГОСТ Р 71487.7-2024. Цифровая промышленность. Качество промышленных данных. Часть 81. Оценка качества промышленных данных. Профилирование. Введ. 2025–07–01. Москва: Стандартинформ, 2024. 16 с.
4. Contributed Packages // The Comprehensive R Archive Network. URL: <https://cran.r-project.org/> (дата обращения: 08/07/2026).

AUTOMATION OF DATA TAGGING, PROFILING AND VALIDATION PROCESSES IN THE R ECOSYSTEM: METHODOLOGICAL ASPECTS AND PRACTICAL SOLUTIONS

Labkovskaya R.

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

The article explores the methodological and software aspects of data quality assurance at the stages of labeling, profiling and validation in the R language ecosystem. The relevance of the study is driven by the high failure rate of ML projects due to the poor quality of the initial data. A comprehensive reproducible pipeline architecture has been developed, integrating the tools labelmachine, safeframe, validate, pointblank, and assertr. The experimental verification was conducted using datasets from medical diagnostics and industrial monitoring at gas stations. The results demonstrate an increase in model accuracy by 18-24 % and a decrease in validation errors by 67 %. The fundamental principles of semantic integrity and declarative control have been formulated, ensuring compliance with the ISO/TS 8000-81 and GOST R 71487.7 standards.

Key words: data quality, data labeling, profiling, validation, R ecosystem, machine learning, reproducibility, data processing pipelines

УДК 519.852

ГРНТИ 27.25.19

ГЕОМЕТРИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОПТИМИЗАЦИИ РАЗМЕЩЕНИЯ МАШИННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ С ВРЕМЕННЫМИ ОГРАНИЧЕНИЯМИ НА ДОСТАВКУ

А. Н. Манилов, П. В. Плотников

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В работе рассматривается задача оптимизации размещения машинно-технологических станций (МТС) с учетом временных ограничений доставки продукции потребителям. Для решения этой проблемы применяется геометрический подход на основе окружностей Аполлония. В основе исследования лежат классические методы аналитической геометрии и теории множеств. В работе предлагается оригинальный способ представления задачи в трехмерном пространстве с последующим переходом к двумерной плоскости, что существенно упрощает процесс поиска оптимального решения. Приводится описание математического аппарата решения задачи размещения МТС. Разработанный метод позволит эффективно решать задачу размещения МТС при различных конфигурациях расположения потребителей.

машинно-технологические станции, задача оптимизации, модели размещения, максимизация, минимизация

Задача оптимального размещения объектов на плоскости и в пространстве с учетом ограничений представляет собой одно из ключевых направлений в теории оптимизации, вычислительной геометрии и логистике. Подобные задачи регулярно возникают при проектировании транспортной инфраструктуры, организации систем реагирования на чрезвычайные ситуации, управлении цепочками поставок и развитии телекоммуникационных инфраструктур. При развертывании логистических схем на практике часто оказывается недостаточно сократить транспортные расходы или минимизировать расстояния. Критически важно обеспечить соблюдение сроков доставки до потребителя, то есть уложиться в отведенное время, учитывая, что объекты расположены в разных географических точках.

Одной из классических формулировок такой задачи выступает задача Вебера [1], суть которой состоит в поиске местоположения объекта, минимизирующего взвешенную сумму расстояний до точек спроса. Со временем модели становились все сложнее. Появилась необходимость учитывать временные ограничения, неоднородность транспортной системы, неопределенность и динамику условий.

Рассмотрим задачи, целью которых является минимизация максимальной задержки доставки либо максимизация максимально возможного времени отправки при условии строгого соблюдения сроков. Подобные сценарии типичны для машинно-технологических станций, систем сельскохозяйственной логистики, организации медицинских поставок, а также для любых критически важных по времени производственных операций.

С геометрической точки зрения решение предложенной задачи связано с окружностями Аполлония и обобщенными задачами покрытия. Так, задача Аполлония [2], сформулированная еще в древнегреческой геометрии, предполагает построение окружности, касающейся трех заданных окружностей. Несмотря на то, что задача классическая, она сохраняет актуальность в современных условиях. В теории вычислительной геометрии были разработаны эффективные алгоритмы, которые в настоящее время активно используются для поиска ближайших определенных объектов и решения задач пространственной оптимизации.

Современные подходы к решению задач оптимизации размещения [3] объектов усилили интерес к геометрическим моделям размещения объектов в условиях неопределенности и временных ограничений. Для решения сложных вычислительных задач, требующих учета условий реального времени, все чаще прибегают к методам робастной оптимизации, выпуклому анализу и алгоритмам вычислительной геометрии. Эти инструменты успешно применяются в системах доставки с использованием дронов, автономных транспортных сетях, при размещении базовых станций мобильной связи, а также в логистике при ликвидации последствий стихийных бедствий.

Пусть на плоскости OXY в пунктах $P_1, P_2, \dots, P_n$ расположены потребители некоторых продуктов или услуг машинно-технологических станций (МТС). Предположим, что в пункт P_i продукт должен быть доставлен не позднее момента времени t_i , определенного заранее. Требуется найти на координатной плоскости такую точку $\bar{P}$, в которую следует поместить МТС для того, чтобы момент отгрузки продукта (или время на оказание услуги) $\bar{t}$ был как можно более поздним и удовлетворял временному ограничению. Будем также предполагать, что продукт одновременно отправляется во все пункты потребления с одной и той же скоростью a .

Тогда решение задачи состоит в максимизации функции:

$$t(x, y) = \min_{1 \leq i \leq n} \left(t_i - \frac{\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}}{a} \right).$$

Или, в других обозначениях:

$$\bar{t} = \max_{(x,y)} t(x,y) = \max_{(x,y)} \min_{1 \leq i \leq n} \left(t_i - \frac{\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}}{a} \right).$$

Координаты (x, y) , в которой функция достигает максимума, определяют точку $\bar{P}$.

Если рассматривать время как третью координату, то задача может быть сформулирована несколько иначе.

В пространстве заданы точки $P_i(x_i, y_i, t_i)$, где $i = \overline{1, n}$. Необходимо определить координаты $(\bar{x}, \bar{y}, \bar{t})$ вершины прямого кругового конуса с осью, параллельной оси OT , удовлетворяющего условиям:

$$(x_i - \bar{x})^2 + (y_i - \bar{y})^2 - a^2(t_i - \bar{t})^2 \leq 0, i = \overline{1, n}.$$

Все заданные точки находятся внутри или на поверхности конуса, где

$$\bar{t} = \max_{t \leq w} t, w = \min_{1 \leq i \leq n} t_i.$$

Обозначим круг L с центром C и радиусом r как $L(C, r)$. Тогда каждой точке $P_i(x_i, y_i, t_i)$ можно поставить в соответствие прямой круговой конус

$$(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 - a^2(t_i - t)^2 = 0.$$

Очевидно, что это соответствие является биективным. Пересечение конуса с плоскостью $t = 0$ позволяет установить соответствие между точками пространства и кругами на плоскости $t = 0$. В свою очередь, точкам P_i и точке $\bar{P}$ поставим в соответствие по вышеприведенному правилу круги на плоскости $t = 0$. В этом случае исходную задачу можно записать в новой формулировке.

На плоскости задано n кругов $L(C_i, r_i)$, где

$$C_i = (x_i, y_i), r_i = -t_i, t_i \leq 0.$$

Для упрощения положим, что $a = 1$. Требуется найти круг $L(\bar{C}, \bar{r})$, который удовлетворяет условиям:

$$L(\bar{C}, \bar{r}) = \bigcap L(C_i, r_i), i = \overline{1, n}.$$

где $\bar{r} = -\bar{t}$ – минимально.

Сформулированная задача является классической задачей Аполлония о построении окружности, касающейся трех данных. При решении необходимо рассмотреть случай, когда ни один из кругов не содержит остальные.

Решение задачи может быть проведено классическими геометрическими или алгебраическими методами, а также с использованием программно-аппаратных средств [4].

Таким образом, предложен геометрический подход к оптимизации размещения машинно-технологических станций с временными ограничениями на доставку. При этом трехмерная задача сводится к решению двумерной. Это значительно упрощает процесс поиска оптимального решения. Использование предложенного подхода на практике для решения реальных задач размещения МТС позволит существенно снизить алгоритмическую сложность решения. Метод может быть успешно использован в сельскохозяйственной логистике [5], системах медицинских поставок и других критически важных производственных операциях.

Список используемых источников

1. Забудский Г. Г., Веремчук Н. С. Решение задачи Вебера на плоскости с минимаксным критерием и запрещенными зонами // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Математика. 2014. Т. 9. С. 10-25.
2. Математическое просвещение. Третья серия, вып.23. М.: МЦНМО, 2019. 240 с.
3. Плотноков П. В. Анализ подходов к решению минимаксных задач размещения // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2025). Санкт-Петербург: СПбГУТ им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, 2025. С. 506-511.
4. Волошинов Д. В., Соломонов К. Н. Программно-аппаратная реализация конструктивных геометрических моделей // Труды Международной конференции по компьютерной графике и зрению «Графикон». 2020. №. 30. С. 83-98.
5. Манилов А.Н. Методы решения многопродуктовых задач развития и размещения машинно-технологических станций // Известия международной академии аграрного образования. 2017. № 37 С. 97-100

GEOMETRIC APPROACH TO OPTIMIZING THE PLACEMENT OF MACHINE-TECHNOLOGY STATIONS WITH TIME RESTRICTIONS ON DELIVERY

Manilov A., Plotnikov P.

The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

The paper considers the problem of optimizing the placement of machine-technological stations (MTS) taking into account the time constraints for delivering products to consumers. To solve this problem, a geometric approach based on Apollonius circles is used. The research is based on classical methods of analytical geometry and set theory. The paper proposes an original method for representing the problem in three-dimensional space, followed by a transition to a two-dimensional plane, which significantly simplifies the process of finding an optimal solution. The paper provides a description of the mathematical framework for solving the problem of MTS placement. The developed method allows for efficient solution of the MTS placement problem in various consumer configurations.

Key words: machine-building stations, optimization problem, placement models, maximization, minimization

УДК: 510.22 510.6 372.851

ГРНТИ 27.03.33

МИНИМАЛИСТИЧНАЯ ТЕОРИЯ МНОЖЕСТВ НА БЕСКВАНТОРНОЙ ЛОГИКЕ

С. А. Медведев

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Разработана теория множеств, в качестве метатеории использующая классическую пропозициональную логику, дополненную правилом конкретизации из ε -исчисления. Ограниченные и неограниченные кванторы, а также все стандартные операции над множествами, в этой теории выражаются через минимальный базис из двух констант (пустое множество и множество всех наследственно-конечных множеств) и трех операций (глобальный выбор, выделение и булеан). По сравнению с классической связкой $FOL+ZFC$, архитектура теории приближена к логике Аристотеля, что рассматривается как ее дидактическое преимущество.

теория множеств, бескванторная логика, оператор глобального выбора, ограниченные кванторы

Хотя метафорическое мышление склонно к спекуляциям, уводящим от истины [1], оно может быть дидактическим инструментом. В частности, то, что логика Аристотеля является образцом естественной рефлексии мышления о себе самом, потому что исторически она является первой логической системой, может быть использовано для облегчения изучения теории множеств студентами. Особенностью логики Аристотеля является то, что все модусы описывают операции над утверждениями, которые в современной логике первого порядка соответствуют формулам с ограниченными кванторами [2]. Этот факт позволяет поставить задачу о такой формализации математической логики, в которой ограниченные кванторы будут более фундаментальными конструкциями, чем неограниченные. Поскольку ограниченные кванторы включают в себя предикат принадлежности, это возможно только в такой аксиоматической теории множеств, которая сама строится на бескванторной логике.

Поскольку любые аксиомы являются тавтологиями, даже в бескванторной логике необходим инструмент для выражения их общезначимости, и таким инструментом может быть правило конкретизации, позаимствованное из ε -исчисления [3]:

$$\phi, x \in FV(\phi)$$

$$\frac{}{\phi[x := \psi],}$$

где ϕ – произвольная общезначимая формула,

ψ – произвольный терм,

x – одна из свободных переменных в формуле ϕ ,

подстановка $\phi[x := \psi]$ выполняется с обычным учетом связывания переменных (терм ψ не должен содержать переменных, которые станут связанными после подстановки). Данное правило может рассматриваться не только как инструмент логического вывода, но и как формальное определение общезначимой формулы.

Язык разработанной теории включает в себя следующие примитивные конструкции:

1. Скобки ().

2. Операции булевой алгебры:

a) $\neg$ отрицание;

b) $\wedge$ конъюнкция;

c) $\vee$ дизъюнкция;

d) $\Rightarrow$ импликация;

e) $\Leftrightarrow$ эквиваленция;

f) ∇ операция Пирса;

g) $\bar{\wedge}$ операция Шеффера;

h) и др.

3. Предикат принадлежности $\in$.

4. Константа для пустого множества $\emptyset$.

5. Константа для множества всех наследственно-конечных множеств Ω .

6. Функциональный символ глобального выбора τ .

7. Функциональный символ выделения $\{ \in: \}$.

8. Функциональный символ булеана $\mathcal{P}$.

В основе разработанной теории лежат операции глобального выбора и выделения. Они описываются следующими аксиомами:

$$x \in A \Rightarrow \tau A \in A;$$

$$x \in \{y \in A : \phi\} \Leftrightarrow x \in A \wedge \phi[y := x].$$

Через эти операции и предикат принадлежности выражаются ограниченные кванторы:

$$\exists x \in A \phi \Leftrightarrow \tau\{x \in A : \phi\} \in \{x \in A : \phi\};$$

$$\forall x \in A \phi \Leftrightarrow \neg \exists x \in A \neg \phi.$$

Из приведенных определений с помощью правила конкретизации можно вывести стандартные правила ввода и исключения ограниченных кванторов ZFC. Кроме того, поскольку оператор глобального выбора определяется аксиомой, которая является частным случаем схемы аксиом для ε -терма, а ε -исчисление является консервативным расширением логики первого порядка, патологические следствия из этих определений тоже невозможны. Все это гарантирует стандартную семантику ограниченных кванторов, определенных таким образом.

Третья базовая операция над множествами – булеан – определяется обычным способом. Сначала вводится понятие подмножества:

$$A \subseteq B \Leftrightarrow \forall x \in A (x \in B).$$

Затем булеан описывается аксиомой степени:

$$x \in \mathcal{P}(A) \Leftrightarrow x \subseteq A.$$

Данное определение эквивалентно определению булеана в ZFC.

Помимо булеана, через подмножества определяется равенство:

$$A = B \Leftrightarrow A \subseteq B \wedge B \subseteq A.$$

Это позволяет сформулировать аксиому экстенциональности так:

$$A = B \Rightarrow (A \in C \Leftrightarrow B \in C) \wedge \tau A = \tau B.$$

Ограничение, которое накладывает данная аксиома на оператор глобального выбора, необходимо для выводимости подстановочности равенства. Булеан и выделение сами определяются через предикат принадлежности, поэтому для них аналогичное поведение доказывается.

Помимо аксиомы экстенциональности, дополнительное ограничение на оператор глобального выбора накладывает аксиома пустого множества:

$$x \in \emptyset \nabla y \in \tau \emptyset.$$

Фактически, эта аксиома гарантирует не только то, что пустое множество не содержит элементов, но и то, что, если к нему применить оператор выбора, он вернет его же. Второе условие заменяет аксиому регулярности в ZFC: пустое множество фундировано, и ни одна из базовых операций над множествами, включая глобальный выбор, не может нарушить фундированность. Поскольку в бескванторной логике невозможны утверждения о том, что что-либо просто существует, можно только предъявить терм, а любой терм может быть только фундированным, отдельная аксиома регулярности становится избыточной.

Аксиома бесконечности в разработанной теории однозначно определяет константу Ω . Она формулируется так:

$$A \subseteq \Omega \Rightarrow (A = \Omega \Leftrightarrow \emptyset \in A \wedge \forall x \in A (\mathcal{P}(x) \in A \wedge x \subseteq A)).$$

Такая формулировка аксиомы гарантирует, что Ω – это минимальное транзитивное множество, содержащее пустое множество и замкнутое относительно булеана.

Используя описанный базис, можно выразить любые операции над множествами, необходимые в прикладных теориях. Для этого сначала необходимо определить ординалы стандартным образом:

$$\text{Ord}(n) \Leftrightarrow \forall x \in n (x \subseteq n) \wedge \forall x \in n \forall y \in n (x = y \vee x \in y \vee y \in x).$$

Теперь получим множество всех конечных ординалов ω выделением из множества всех наследственно-конечных множеств Ω :

$$\omega = \{ x \in \Omega : \text{Ord}(x) \}.$$

Используя только имеющиеся в распоряжении операции, увеличение и уменьшение ординала на единицу можно выразить так:

$$n + 1 = \{ x \in \mathcal{P}(n) : \text{Ord}(x) \};$$

$$n - 1 = \{ x \in n : \exists m \in n (x \in m) \} \Leftarrow 0 < n < \omega.$$

Через эти операции можно выразить сложение ординалов:

$$x + y = x \Leftarrow y = 0;$$

$$x + y = (x + 1) + (y - 1) \Leftarrow 0 < y < \omega;$$

Это, в свою очередь, позволяет описать уровни кумулятивной иерархии стандартным образом:

$$V_0 = \emptyset;$$

$$V_\omega = \Omega;$$

$$V_{n+1} = \mathcal{P}(V_n).$$

Теперь можно выразить неограниченные кванторы:

$$\exists x \phi \Leftrightarrow \exists n \in \omega (\exists x \in V_{\omega+n} \phi);$$

$$\forall x \phi \Leftrightarrow \forall n \in \omega (\forall x \in V_{\omega+n} \phi).$$

В рамках кумулятивной иерархии $V_{\omega+\omega}$ эти кванторы будут вести себя стандартным образом, но, строго говоря, они слабее, чем классические логические неограниченные кванторы.

Аналогичным образом можно выразить пару и объединение – операции, необходимые для завершения полного базиса теории Цермело [4]. Сначала нужно ввести вспомогательную операцию **R**, возвращающую ординал, достаточный для того, чтобы все параметры этой операции принадлежали соответствующему уровню кумулятивной иерархии:

$$\mathbf{R}(x_1, x_2, \dots, x_m) := \tau \{ n \in \omega : x_1 \in V_{\omega+n} \wedge x_2 \in V_{\omega+n} \wedge \dots \wedge x_m \in V_{\omega+n} \}.$$

После этого пару и объединение можно выразить через выделение из соответствующего уровня кумулятивной иерархии:

$$\{ A, B \} := \{ x \in V_{\omega+\mathbf{R}(A,B)} : x = A \vee x = B \};$$

$$\cup A := \{ x \in V_{\omega+\mathbf{R}(A)} : \exists y \in A (x \in y) \}.$$

Полная схема замены в предложенной теории отсутствует, потому что сама архитектура теории подразумевает ограниченный универсум, в котором все бесконечные уровни кумулятивной иерархии можно пронумеровать конечными ординалами. Однако если существует такой конечный ординал n , что все результаты преобразования элементов множества X функцией f лежат на уровне $V_{\omega+n}$, то частичную замену можно выразить через уже определенные операции следующим образом:

$$Y = \{ y \in V_{\omega+n+1} : \exists x \in X (y = f(x)) \}.$$

Таким образом, универсумом предложенной теории является класс $V_{\omega+\omega}$, достаточный для прикладной математики. В нем возможны натуральные, рациональные, вещественные числа, строки, а также функции и функциональные пространства над ними. Несчетные ординалы невозможны, но они являются предметом исследований преимущественно внутри теории

множеств, поэтому для прикладных задач это не критично. Однако можно предположить, что в бескванторной логике все множества конструктивны по Геделю [5]. Если это подтвердится, то в разработанной теории континуум-гипотеза станет теоремой, и тогда канонические представители мощностей бесконечных множеств можно получить путем применения булеана к множеству конечных ординалов разное количество раз (или просто как бесконечные уровни кумулятивной иерархии). Но даже если это не так, разработанная теория намного проще ZFC и при этом достаточно мощна для решения прикладных задач.

Можно еще отметить, что при ее использовании для быстрого обучения студентов теории множеств не обязательно выражать все операции над множествами через минимальный базис, потому что формулы для их определения, аналогичные аксиоме степени, проще. Кроме того, это будет ближе к классическому базису теории множеств. Если добавить унарное объединение, определенное стандартным образом, и упростить предикат *Verum* до такой формулировки:

$$\text{Verum}(A) \Leftrightarrow \emptyset \in A \wedge \forall x \in A (\mathcal{P}(x) \in A),$$

то это позволяет упростить доказательство консервативности теории относительно фрагмента ZFC, достаточного для выражения всей прикладной математики. Аксиома бесконечности в полной формулировке – самая сложная в теории, и вынесение части ее сложности в отдельную аксиому объединения может быть дидактически оправдано.

Список используемых источников

1. De Man P. The Epistemology of Metaphor / P. De Man // Critical Inquiry, 1978. 5(1). PP. 13-30.
2. Łukasiewicz J. Aristotle's syllogistic: from the standpoint of modern formal logic / J. Łukasiewicz: Oxford, At the Clarendon Press, 1957. 250 p. ISBN 0198241445.
3. Hilbert D. Die logischen Grundlagen der Mathematik / D. Hilbert. // Mathematische Annalen. 1923. Vol. 88. PP. 151-65.
4. Zermelo E. Untersuchungen über die Grundlagen der Mengenlehre. / E. Zermelo // Mathematische Annalen. 1908. I. Vol. 65(2). PP. 261-281.
5. Gödel K. The Consistency of the Continuum Hypothesis / K. Gödel // Princeton University Press. 1940. 69 p.

MINIMALISTIC SET THEORY ON QUANTIFIER-FREE LOGIC

Medvedev S.

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

A set theory is developed that uses classical propositional logic as its metatheory, extended by the concretization rule from ε -calculus. Bounded and unbounded quantifiers, as well as all standard operations on sets, are expressible in this theory through a minimal basis comprising two constants (the empty set and the set of all hereditarily finite sets) and three operations (global choice, separation, and powerset). Compared to the standard FOL+ZFC framework, the architecture of this theory is closer to Aristotle's logic, which is considered as its didactic advantage.

Key words: *set theory, quantifier-free logic, global choice operator, bounded quantifiers*

УДК 004.032.26
ГРНТИ 28.23.37

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ РЕГРЕССИИ С ПОМОЩЬЮ НЕЙРОННОЙ СЕТИ НА ОСНОВЕ МОДЕЛЕЙ МЕМЕТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ

Д. А. Молоков

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Для обучения нейронных сетей, как правило, используют методы градиентного спуска или эволюционные методы, например генетические алгоритмы. Каждый из подходов обладает как своими преимуществами, так и недостатками. В данной статье исследуется модификация генетического алгоритма градиентным спуском для решения задачи регрессии с помощью нейронной сети относительно стандартных подходов. В отличие от классических меметических алгоритмов, где локальная оптимизация применяется до сходимости, в данной работе предлагается использовать усеченный градиентный спуск для сохранения генетического разнообразия.

нейронные сети, генетические алгоритмы, градиентный спуск, меметические алгоритмы, методы обучения нейронных сетей.

Согласно статистике, ИИ все активнее внедряется в компании, так уже в 2025 году около 77 % компаний по всему миру используют хотя бы одно решение на основе ИИ, а в России этот процент доходит до 62 % [1]. Данные цифры лишь подтверждают растущий интерес к данным технологиям не только со стороны обычных пользователей, но и среди компаний.

Компании, выпускающие продукты с нейросетевыми технологиями, все активнее усложняют архитектуру нейронных сетей, чтобы добиться более точного и широкого инструментария для сохранения конкурентоспособности своего продукта.

От сложности архитектуры зависит и длительность обучения нейронной сети. В настоящее время для обучения нейронных сетей с нуля принято использовать методы градиентного спуска или эволюционные методы, преимущественно генетические алгоритмы. Оба данных подхода обладают как своими преимуществами, так и недостатками.

Градиентный спуск:

- простой, не ресурсозатратный алгоритм;
- зависимость от начальной точки;
- зависимость от шага обучения;
- затухание градиента;
- взрыв градиента.

Генетические алгоритмы:

- способность выхода из локальных минимумов;
- исследование функции глобально;
- ресурсозатратный алгоритм.

Конечно, для градиентного спуска были разработаны модификации, а также дополнительные технологии, что исправляют большинство недостатков данного подхода. Однако ГС не хватает особенностей генетического алгоритма, а именно глобальное исследование и способность выходить из локальных минимумов.

Для объединения данных методов можно выделить две наиболее значимые технологии: обучение с локальным уточнением и меметические алгоритмы.

Метод обучения с локальным уточнением заключается в дополнительном обучении уже обученной нейросети градиентным спуском, что позволяет быстро найти перспективные результаты ресурсозатратными методами, а затем довести до экстремума более простым методом.

Вторым подходом являются меметические алгоритмы, идея которых заключается в полноценной конвергенции методов градиентного спуска и генетического алгоритма.

Для меметических алгоритмов существует две модели: модель Болдуина и модель Ламарка.

Суть Болдуина заключается в том, чтобы использовать градиентный спуск в качестве функции пригодности, не изменяя генотип организма. Модель Ламарка же отличается тем, что после завершения одной эпохи генетический алгоритм уточняет координаты, которые находятся в генотипе особи.

Соответственно, основой меметических алгоритмов является генетический алгоритм, а градиентный спуск является дополнением. Поэтому для эксперимента определимся с условиями алгоритма и операторами ГА.

Генотип состоит из n чисел, которыми являются веса нейронной сети. Каждая популяция состоит из 30 особей, алгоритм длится 500 эпох.

Так как в данной статье исследуется меметический алгоритм в задаче регрессии с помощью нейронных сетей, в качестве операторов будут использоваться те, что предназначены для чисел, а значит:

- Функция пригодности: стандартный градиентный спуск. Важно отметить, что будет использовать ГС не до полного уточнения, а в течение 5 итераций. Данный выбор обоснован тем, чтобы находящиеся рядом организмы не попадали в один локальный минимум и сохраняли генетическое разнообразие.

- Выбор родителей: панмиксия.
- Рекомбинация: промежуточная рекомбинация.
- Мутация: мутация вещественных особей, Гауссовская мутация, с вероятностью мутации каждой аллели, как $\frac{1}{n}$, где n – длина генотипа.
- Отбор родителей: 10 % элитаризм, 90 % – создание новых особей. Данный выбор оператора также связан с сохранением генетического разнообразия, но и сохранения лучших результатов.

В качестве задачи регрессии будет предсказание функции $y = 2^x \sin(2^{-x})$. Данная функция представлена на рис. 1.

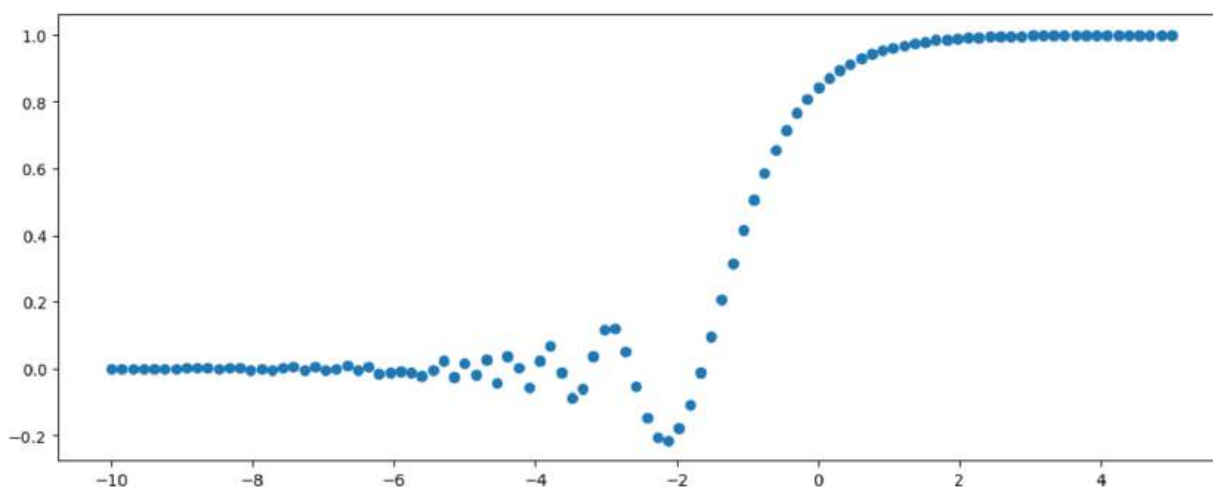


Рис. 1. График выбранной функции

Значения для обучающего датасета будут взяты как зашумленные значения функции. Нейронная сеть будет состоять из одного полносвязного слоя из пяти нейронов. Результат точности представлен в таблице 1, а графики ошибок – на рис. 2.

ТАБЛИЦА 1. Сравнение метрик точности

Метод обучения	MSE	MAE	R ²
Генетический алгоритм	0.002496	0.030007	0.988460
Модель Болдуина	0.002268	0.032388	0.989512
Модель Ламарка	0.001622	0.023550	0.992502
ГС Adam с шагом 0.1	0.000728	0.016570	0.996636
ГС Adam с шагом 0.01	0.000759	0.018969	0.996490
ГС Adam с шагом 0.001	0.001403	0.023565	0.993514

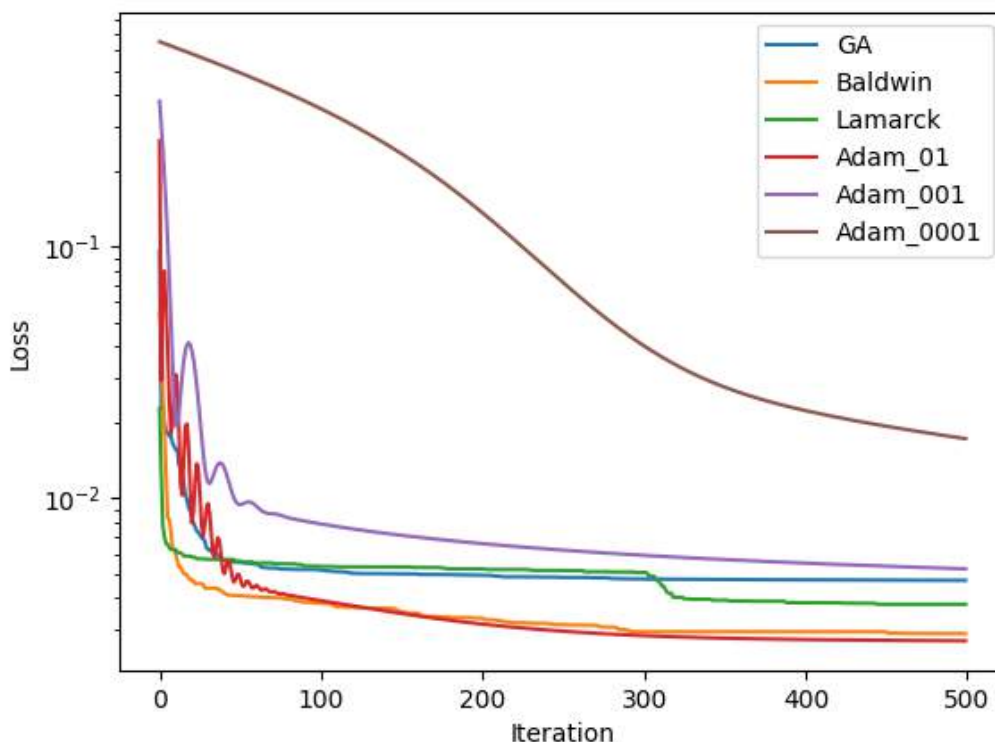


Рис. 2. Графики ошибок

Анализируя таблицу (Таблица 1), представленную выше, получаем, что модификация генетического алгоритма улучшила результат нейронной сети относительно стандартного алгоритма. Так, модель Ламарка улучшила результат $\approx 35\%$.

В ходе эксперимента было получено, что модификация генетического алгоритма градиентным спуском повышает качество обучения нейронной сети относительно стандартного. Модель Ламарка показала наибольший прирост качества среди эволюционных методов, при этом градиентный спуск показал наилучший результат из всех рассматриваемых методов.

Перспективы исследования меметических алгоритмов заключаются в исследовании влияния различных генетических операторов для улучшения уже полученного результата.

Список используемых источников

1. Авраменко М. Интеграция искусственного интеллекта в управление бизнесом и процессами: статистика, решения и рекомендации. URL: <https://vc.ru/hr/1834588-integraciya-iskusstvennogo-intellekta-v-upravlenie-biznesom-i-processami-statistika-resheniya-i-rekomendacii> (дата обращения: 27.05.2026).

Статья представлена научным руководителем, заведующим кафедрой ИУС СПбГУТ, кандидатом технических наук, доцентом В. Л. Литвиновым.

SOLVING A REGRESSION PROBLEM USING A NEURAL NETWORK BASED ON MEMETIC ALGORITHM MODELS

Molokov D.

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

Gradient descent methods and evolutionary approaches, such as genetic algorithms, are commonly used for training neural networks. Each of these approaches has its own advantages and limitations. This paper investigates a modification of the genetic algorithm enhanced with gradient descent for solving a regression problem using a neural network in comparison with standard approaches. Unlike classical memetic algorithms, where local optimization is performed until convergence, the proposed approach employs truncated gradient descent in order to preserve genetic diversity within the population.

Key words: *neural networks, genetic algorithms, gradient descent, memetic algorithms. Neural network training methods*

УДК 004.5:004.415.2:004.438

ГРНТИ 50.41.25

РАЗРАБОТКА ПЛАТФОРМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ КОНТРАКТАМИ В МИКРОСЕРВИСНОЙ АРХИТЕКТУРЕ НА ОСНОВЕ OPENAPI И ASYNCAPI

Д. А. Степанян

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Статья посвящена разработке платформы contract-platform для автоматизации управления жизненным циклом сервисных контрактов в микросервисной архитектуре на основе OpenAPI и AsyncAPI. Актуальность обусловлена ростом числа межсервисных интеграций и рисками ручного сопровождения контрактов: несогласованным версионированием, поздним выявлением breaking-изменений и непрозрачностью публикации артефактов. В работе обоснован подход, сочетающий структурный compatibility-анализ и рекомендации SemVer. Описана архитектура решения, включающая модуль управления контрактами и версиями, асинхронную оркестрацию generation jobs, пайплайны генерации/публикации для OpenAPI и AsyncAPI, а также контур наблюдаемости с Correlation ID, publication logs и метриками. Представлены результаты апробации: подтверждена работоспособность сквозного сценария от загрузки спецификации до публикации артефактов в Nexus и регистрации схем в Schema Registry, снижение доли ручных операций и повышение предсказуемости релизного процесса.

управление API-контрактами, OpenAPI, AsyncAPI, compatibility-анализ, SemVer, микросервисная архитектура, contract-first, генерация артефактов, Schema Registry, Nexus, observability, автоматизация интеграционных процессов

В современных микросервисных системах сервисные контракты становятся ключевым механизмом согласования интеграций между командами. При отсутствии единого процесса сопровождения контрактов изменения в OpenAPI- и AsyncAPI-спецификациях часто обрабатываются вручную: отдельно выполняются проверка совместимости, выбор шага версионирования, генерация артефактов и публикация. Это повышает риск breaking-изменений и снижает предсказуемость релизов, что особенно критично при contract-first подходе [1].

Для решения данной проблемы разработана платформа contract-platform, обеспечивающая сквозную автоматизацию жизненного цикла контрактов: загрузка спецификации, валидация, compatibility-анализ, SemVer-

рекомендация, генерация и публикация результатов [2]. На рисунке 1 представлена компонентная архитектура платформы.

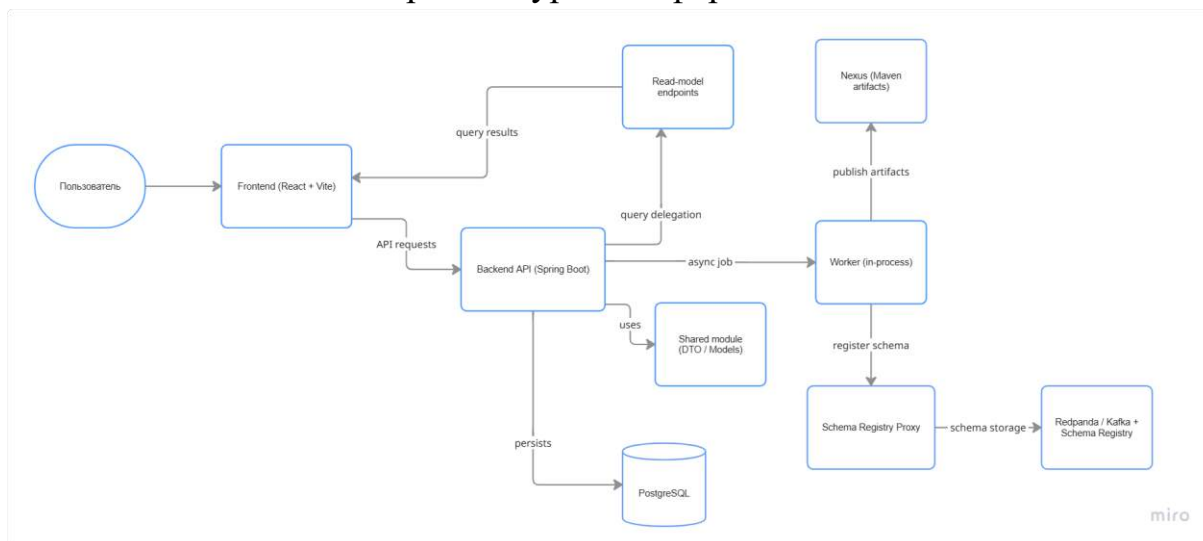


Рис. 1. Диаграмма компонентов сервиса contract-platform

Точкой входа выступает API-контур управления контрактами, принимающий версии OpenAPI/AsyncAPI и формирующий generation jobs. Ядром обработки является асинхронный pipeline, реализующий ветвление по типу контракта и публикацию в целевые инфраструктуры: Nexus (Maven-артефакты) и Schema Registry (схемы событий) [3]. Для диагностики и эксплуатации используется read-model, publication logs и сквозной Correlation ID. Маршрут данных и распределение ответственности между компонентами показаны на рисунке 2.

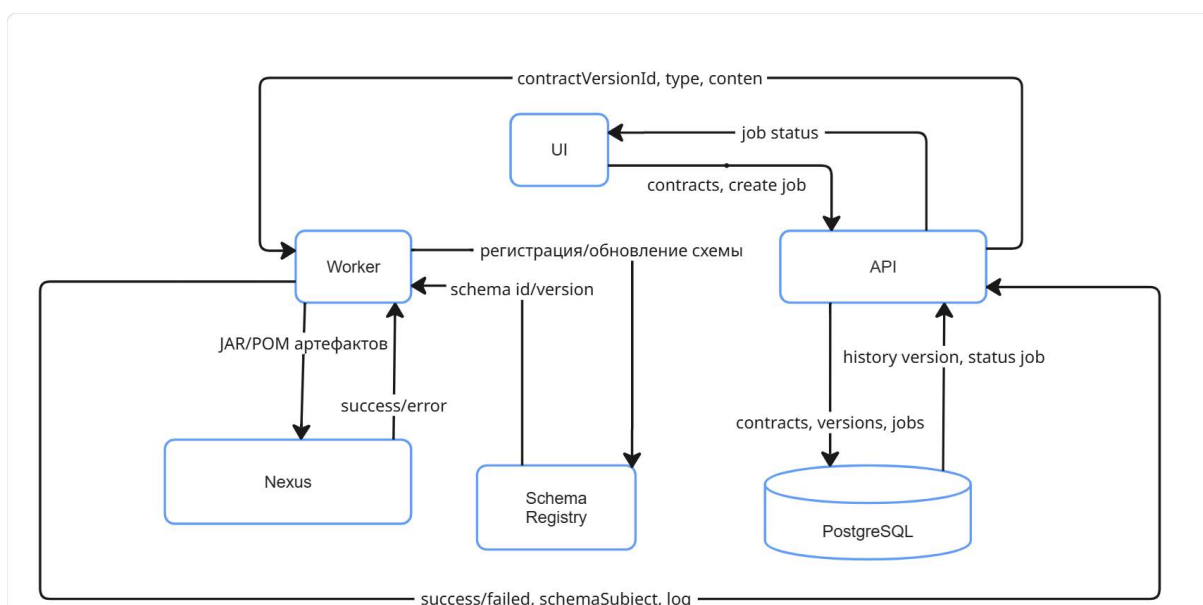


Рис. 2. Схема маршрута данных и распределения ответственности между компонентами

С технической точки зрения задача решается через структурный анализ изменений контрактов с классификацией влияния на потребителей и формированием рекомендации SemVer (MAJOR/MINOR/PATCH). В качестве базового подхода принят вариант SemVer + автоматизированный compatibility-анализ с учетом backward compatibility для событийного контура [4]. Сравнение альтернативных подходов к версионированию и миграции приведено в таблице 1.

ТАБЛИЦА 1. Сравнительный анализ подходов к версионированию и миграции

Критерий	Ad-hoc версионирование	Ручная экспертная оценка	SemVer + автоанализ	SemVer + автоанализ + Schema Registry policy
Предсказуемость релизов	Низкая	Средняя	Высокая	Высокая
Риск пропуска breaking-change	Высокое	Средняя	Низкий	Низкий
Масштабируемость на много сервисов	Низкая	Средняя	Высокая	Высокая
Трудоемкость сопровождения	Низкая в начале, высокая в эксплуатации	Высокое	Средняя	Средняя
Единообразие решений между командами	Низкое	Средняя	Высокое	Высокая
Поддержка event-сценариев	Частичная	Частичная	Средняя	Высокая
Поддержка миграционных рекомендаций	Отсутствует	Частичная	Высокая	Высокая
Итог	Не рекомендуется	Ограниченно применимо	Рекомендуется	Рекомендуется как целевой

Интеграционная логика платформы реализована как последовательный сценарий: upload версии, анализ совместимости, запуск generation job, выполнение publish-этапа и фиксация итогового состояния в БД. Диаграмма последовательности данного сценария приведена на рисунке 3. Для повы-

шения устойчивости реализованы классификация ошибок (retryable/non-retryable/business), retry-политика с backoff, watchdog-восстановление зависших задач и компенсационные действия при частичных отказах публикации [5].

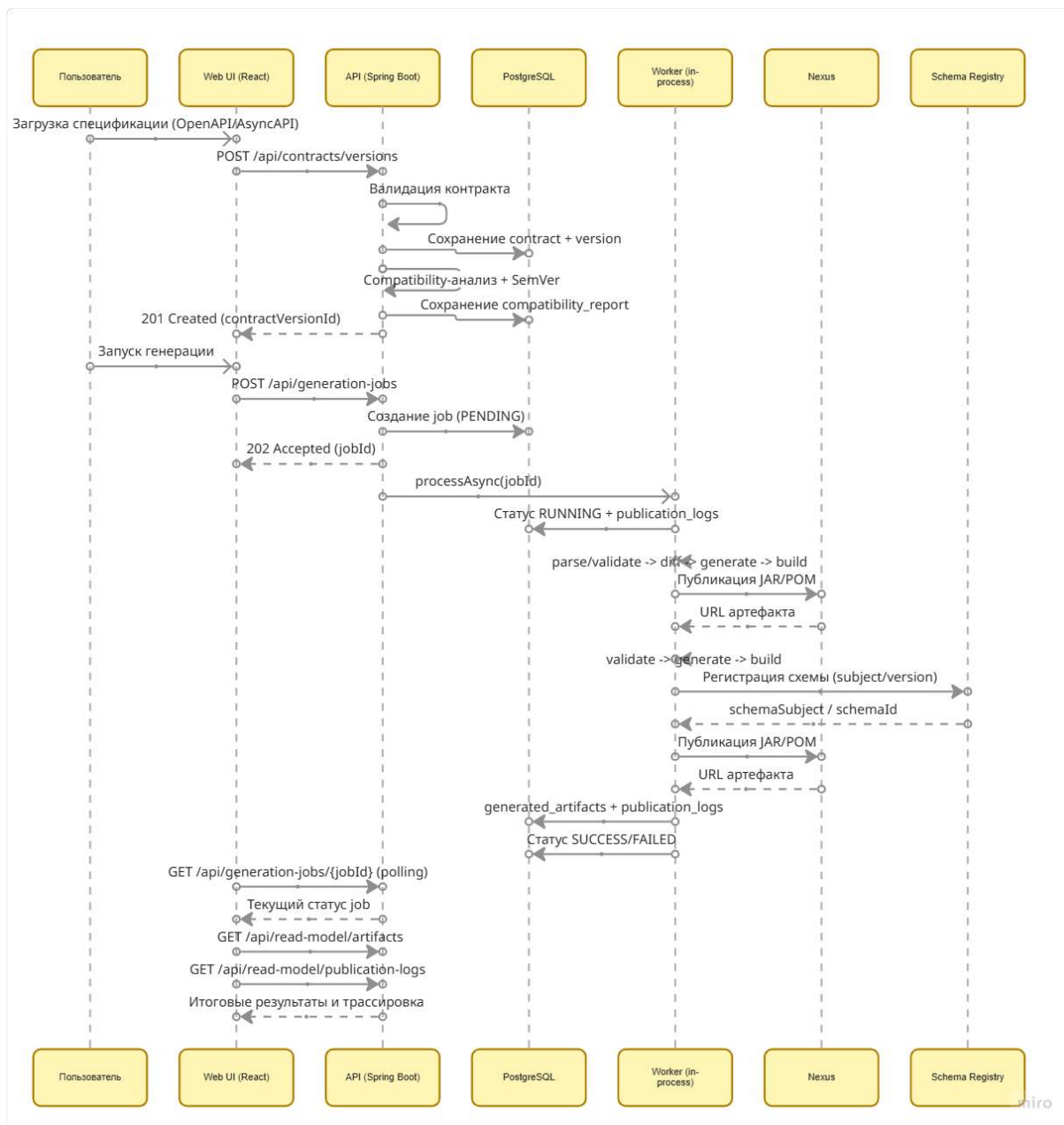


Рис. 3. Диаграмма последовательности интеграционного сценария

Программная реализация выполнена на Java 21 и Spring Boot 3; persistence-слой построен на PostgreSQL с миграциями Flyway, пользовательский интерфейс – React/Vite. Инфраструктурный контур разворачивается через Docker Compose и включает api, frontend, PostgreSQL, Kafka/Redpanda, Schema Registry проху и Nexus. Верификация качества ор-

ганизована через CI-конвейер GitHub Actions (backend quality, integration/E2E, frontend quality, security scan).

Таким образом, разработанная платформа устраняет разрыв между изменением спецификации и эксплуатационно значимым результатом публикации, снижает долю ручных операций и повышает управляемость эволюции контрактов в микросервисной архитектуре.

Список используемых источников

1. Newman S. Building Microservices: Designing Fine-Grained Systems. 2nd ed. O'Reilly Media, 2021.
2. OpenAPI Initiative. OpenAPI Specification 3.0.3. URL: <https://spec.openapis.org/oas/v3.0.3> (дата обращения: 30.05.2026).
3. AsyncAPI Initiative. AsyncAPI Specification. URL: <https://www.asyncapi.com/docs/reference/specification/latest> (дата обращения: 30.05.2026).
4. Semantic Versioning 2.0.0. URL: <https://semver.org/> (дата обращения: 30.05.2026).
5. Confluent. Schema Registry Documentation. URL: <https://docs.confluent.io/platform/current/schema-registry/index.html> (дата обращения: 30.05.2026).

Статья представлена научным руководителем, кандидатом технических наук, доцентом кафедры ПИиВТ СПбГУТ М. А. Бирюковым.

DEVELOPMENT OF A PLATFORM FOR AUTOMATED CONTRACT MANAGEMENT IN A MICROSERVICE ARCHITECTURE BASED ON OPENAPI AND ASYNCAPI

Stepanyan D.

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

the paper is devoted to the development of the contract-platform, designed to automate service contract lifecycle management in a microservice architecture based on OpenAPI and AsyncAPI. The relevance of this work is driven by the growing number of inter-service integrations and the risks of manual contract maintenance, including inconsistent versioning, late detection of breaking changes, and lack of transparency in artifact publication. The study substantiates an approach that combines structural compatibility analysis with SemVer recommendations. The proposed architecture includes a contract and version management module, asynchronous generation job orchestration, generation/publication pipelines for OpenAPI and AsyncAPI, and an observability layer with Correlation ID, publication logs, and metrics. The implementation results confirm the operability of an end-to-end workflow from specification upload to artifact publication in Nexus and schema registration in Schema Registry, as well as a reduction in manual operations and improved predictability of the release process.

Key words: API contract management, OpenAPI, AsyncAPI, compatibility analysis, SemVer, microservice architecture, contract-first, artifact generation, Schema Registry. Nexus, observability, integration process automation

УДК 004.725.5

ГРНТИ 20.51.19

ВОПРОСЫ АДМИНИСТРИРОВАНИЯ КОРПОРАТИВНОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

В. А. Тарасов

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Подходы к организации управления современной корпоративной инфраструктурой зависят от множества факторов: масштаба организации, профиля ее деятельности, технологического оборудования, особенностей зданий и помещений, организационной инфраструктуры, объема и характера обрабатываемой информации, географического расположения персонала, специфики коммуникации с партнерами, требований к надежности, безопасности и качеству обслуживания. Кроме того, велико и количество объектов управления – оборудование, программное обеспечение, объекты инфраструктуры, политики информационной безопасности и системы разграничения полномочий.

администрирование, информационная система, информационная инфраструктура, корпоративная сеть. Network management system

С развитием информатизации, ростом количества вычислительной техники и иного офисного оборудования, распространением вычислительных сетей и возможностей подключения к ним новых типов устройств все более актуальными становилась задачи управления информационной инфраструктурой.

Если на заре эпохи информационных сетей для их обслуживания и управления, в силу немногочисленного состава оборудования и его узкой специализации, не требовалось большое количество административного персонала, а порой и вообще не требовались специальные сотрудники, то в настоящее время значительное количество разнородного оборудования и программного обеспечения требует много персонала и специальных средств управления.

Перед персоналом, обслуживающим информационную инфраструктуру крупной организации, стоят следующие задачи:

– планирование структуры, состава и модификации системы;

- разработка инструкций, правил и регламентов, призванных обеспечить корректную эксплуатацию и обслуживание информационной инфраструктуры;
- обучение и переобучение персонала;
- внедрение новых технологий;
- создание, модификация и обслуживание базовой инфраструктуры – структурированных кабельных систем и пр.
- формирование политик разграничения доступа с учетом организационной инфраструктуры, функций и полномочий персонала на основе доменов;
- проектирование специализированного программного обеспечения для поддержки организационных и технологических процессов;
- обеспечение защиты от несанкционированного доступа с использованием антивирусного программного обеспечения, брандмауэров, виртуальных сетей, туннелирования, шифрования, систем ограничения доступа в помещения и к элементам инфраструктуры, средств видеонаблюдения, датчиков движения, технологий защиты сред передачи и пр.
- репликация, восстановление и тестирования резервных копий данных;
- сбор и анализ статистики на основе мониторинга с целью выявления сбоев, неисправностей, несанкционированных действий, слабых мест и пр. проблем и последующее их устранение;
- поддержка пользователей;
- восстановление после ошибочных ситуаций;
- согласование с филиалами и организациями-партнерами вопросов использования объединенной инфраструктуры (интранет, экстранет);
- участие в приобретении оборудования, программного обеспечения и пр. необходимых компонентов инфраструктуры;
- ввод в строй рабочих мест для новых пользователей;
- настройка коммуникационных средств – коммутаторов, маршрутизаторов, медиаконвертеров и пр.;
- установка серверных платформ, систем виртуализации;
- решение вопросов повышения отказоустойчивости – резервирование серверов, среды передачи и пр.;
- применение мер обеспечения помехоустойчивости;
- использование средств резервного энергоснабжения – источников бесперебойного питания и генераторов;
- оперативное управление инфраструктурой, реконфигурация.

В рамках решения задачи управления корпоративной информационной инфраструктурой необходимо решать множество подзадач.

Без использования системы управления перед административным персоналом может возникнуть ряд проблем [1], а именно:

- в условиях отсутствия централизованной диагностики компонентов невозможно полноценно бороться с проблемами понижения производительности;
- система в целом может вовсе не обеспечивать работоспособность, что способно привести к недееспособности организации;
- качество предоставления информационных услуг может опуститься ниже допустимого уровня;
- сбои в конфигурировании системы и обеспечении безопасности способны привести к несанкционированному доступу и соответствующим издержкам.

Для предотвращения подобного рода проблем целесообразно использовать системы управления сетью (NMS – Network Management System) [2]. Такие системы способны осуществлять мониторинг состояния оборудования, безопасности, хранить данные конфигурации в базе, осуществлять анализ статистики, конфигурирование компонентов инфраструктуры, ручную и автоматическую регулировку параметров, внедрять политики безопасности и т. д. Кроме того, целесообразно разграничить полномочия административного персонала и распределить приоритеты.

Вместе с тем, существующие системы управления сетью не способны обеспечить универсальности, широкого охвата элементной базы.

Решением данной проблемы в перспективе могут стать системы с использованием интеллектуальных агентов, однако их обучение является отдельной задачей.

Список используемых источников

1. Кондратьев А. Н., Луценко М. Н., Князев А. А. Анализ применяемых программных средств при администрировании корпоративной сети // Инновационный потенциал развития общества: взгляд молодых ученых: сборник научных статей 3-й Всероссийской научной конференции перспективных разработок: в 4 т., Курск, 01 декабря 2022 года. Том 3. Курск: Юго-Западный государственный университет, 2022. С. 149-153.

2. Тарасов В. А. Организация управления корпоративной информационной инфраструктурой и безопасности информационных процессов // Региональная информатика и информационная безопасность: сборник трудов Санкт-Петербургской международной конференции и XIV Санкт-Петербургской межрегиональной конференции, Санкт-Петербург, 29–31 октября 2025 года. Выпуск 15. Санкт-Петербург: Региональная обще-

ственная организация «Санкт-Петербургское Общество информатики, вычислительной техники, систем связи и управления», 2025. С. 35-37.

Статья представлена заведующим кафедрой ИУС СПбГУТ, кандидатом технических наук, доцентом В. Л. Литвиновым.

CORPORATE INFORMATION INFRASTRUCTURE ADMINISTRATION ISSUES

Tarasov V.

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

Approaches to managing modern corporate infrastructure depend on many factors: the scale of the organization, the profile of its activities, technological equipment, the characteristics of buildings and premises, organizational infrastructure, the volume and nature of information processed, the geographical location of personnel, the specifics of communication with partners, requirements for reliability, security and quality of service. In addition, there are a large number of management objects – equipment, software, infrastructure facilities, information security policies and separation of powers systems.

Key words: *administration, information system, information infrastructure, corporate network. Network management system*

УДК 004.45

ГРНТИ 50.41.15

ПЕРСПЕКТИВЫ ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЯ ОПЕРАЦИОННЫХ СИСТЕМ В ГОСУДАРСТВЕННОМ СЕКТОРЕ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

М. В. Устинов, А. А. Шиян

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

В данной статье рассматриваются актуальные проблемы и перспективы импортозамещения операционных систем в государственном секторе Российской Федерации. Проведен сравнительный анализ трех ведущих отечественных операционных систем: Astra Linux, Alt Linux и РЕД ОС. В работе исследована технологическая база каждой системы, уровни сертификации Федеральной службы по техническому и экспортному контролю и Минобороны, экосистема прикладного программного обеспечения, а также выявлены преимущества и недостатки каждого решения. Проанализирована нормативно-правовая база, регулирующая процесс импортозамещения и на основе проведенного исследования сформулированы выводы о перспективах развития отечественного программного обеспечения в государственном секторе на ближайшие три-пять лет.

импортозамещение, операционная система, государственный сектор, ФСТЭК, Astra Linux, Alt Linux, РЕД ОС, программное обеспечение, цифровая экономика, информационная безопасность

Из-за санкций против России, которые особенно усилились после 2022 года, вопрос технологического суверенитета страны встал как никогда остро. Государственный сектор, зависевший на протяжении многих лет от зарубежного программного обеспечения, теперь столкнулся с необходимостью быстрой замены западных решений на отечественные аналоги. Например, операционная система Microsoft Windows использовалась повсеместно в органах государственной власти и бюджетных учреждениях.

Стоит отметить, что зависимость от иностранного программного обеспечения объясняется несколькими факторами. Первым ключевым фактором можно называть исторический. Он связан с глобальным доминированием западных ИТ-платформ в период активной цифровизации 1990-2000-х годов. Массовая компьютеризация государственного сектора проводилась при помощи решений Microsoft и IBM, потому что они предлагали готовые и удобные продукты. Из-за этого мы получили экосистему, в которой все рабочие процессы, от документооборота до взаимодействия с гражданами, зависели от проприетарных форматов файлов компаний, упомянутых выше.

Поэтому переход на отечественные ОС становится фундаментом и для обеспечения безопасности прикладных сервисов, в том числе, например, платформ обратной связи, играющих ключевую роль в современном цифровом мире [1]. Второй фактор – существенное преимущество зарубежного ПО в плане удобства использования, развитости экосистемы и функционала программ. Это произошло, потому что эти продукты долго дорабатывались, учитывая запросы пользователей.

Однако в 2022 году Microsoft приостановила обслуживание и поддержку своих продуктов в России. Поэтому использование решений этой и прочих ушедших компаний стало невозможным, ведь это влечет за собой риски безопасности, которые никак не допустимы в целом и в государственном секторе в частности. Именно это сделало процесс импортозамещения таким важным и необходимым. Сегодня перед государством стоит задача не просто заменить одну операционную систему на другую, а создать технологически независимую инфраструктуру, которая может функционировать независимо от внешних ограничений.

Нормативно-правовая база импортозамещения

Перед анализом самих операционных систем, необходимо рассмотреть нормативно-правовую базу, которая регулирует процесс импортозамещения в сфере информационных технологий. Рассмотрим ключевые документы: Постановление Правительства РФ от 16 ноября 2015 г. № 1236 (в редакции 2025 г.), Постановление Правительства РФ от 23 декабря 2024 г. № 1875 и Указ Президента РФ от 30 марта 2022 г. № 166.

Первый документ регулирует формирование и ведение Единого реестра российских программ, обозначает критерии, при соблюдении которых ПО признается российским, а именно: принадлежность исключительных прав российским субъектам, локализация инфраструктуры и поддержки, отсутствие ограничений на распространение в России, соответствие критериям безопасности и другие [2].

Второй документ устанавливает меры национального режима: запреты на закупку иностранного ПО, преимущество для отечественного ПО [3]. Применяются же эти меры исходя из наличия ПО в Едином реестре российских программ.

Третий документ обязывает государственные органы полностью перейти на отечественное ПО на значимых объектах критической информационной инфраструктуры с 1 января 2025 года [4].

Единый реестр российских программ – главный инструмент реализации этих норм. В него включаются операционные системы и другое ПО, отвечающее требованиям законодательства РФ. Закупка иностранного ПО разрешается лишь в некоторых случаях: если в реестре нет российского аналога нужного класса либо если отечественные продукты не соответствуют функциональным или техническим требованиям (при этом, необходимо обоснование). Для операционных систем эти нормы особенно важны, так как они относятся к базовому системному программному обеспечению.

Сравнительный анализ отечественных операционных систем Astra Linux

Операционная система Astra Linux, разрабатываемая компанией «Базальт СПО», является одним из важнейших достижений программы импортозамещения. Эта система, построенная на базе Debian GNU/Linux, использует пакетный менеджер apt. Ядро системы является модифицированной версией ядра Linux с дополнительными механизмами безопасности.

Особое внимание нужно уделить сертификации Astra Linux. Система представлена несколькими редакциями, среди которых Special Edition («Смоленск») предназначена для обработки конфиденциальной информации и данных, которые содержат государственную тайну. Эта редакция оснащена механизмами мандатного разграничения доступа и доверенной загрузки, исключающими несанкционированное изменение конфигурации на уровне BIOS. Система получила сертификаты ФСТЭК России и ФСБ России [5]. Именно это позволяет использовать ее для обработки секретных данных.

Особого внимания заслуживает также версия Astra Linux, которая адаптирована для работы с отечественным процессором «Эльбрус». Сочетание «Эльбруса» и Astra Linux обеспечивает еще больший уровень защищенности.

Astra Linux также совместим с отечественными офисными пакетами, такими как «Р7-Офис» и «МойОфис». А благодаря инструментам, таким как Wine, можно запускать программы, написанные для Windows. Это очень важно, так как позволяет сотрудникам легче перейти с привычного ПО на отечественный аналог.

На данный момент Astra Linux активно внедряется: только в 2022 году для нужд органов внутренних дел была закуплена 31 тысяча лицензий. Министерство обороны рассматривает версию Special Edition в качестве основной операционной системы, для использования ее в вооруженных силах РФ.

Успешным примером внедрения отечественных продуктов можно назвать опыт Татарстана, где в рамках программы «Цифровой суверенитет» более 150 тысяч рабочих мест и 82 министерства перешли на Astra Linux и «Р7-Офис» [6, с. 147].

Таким образом, к преимуществам Astra Linux относятся: наивысший уровень сертификации ФСТЭК и ФСБ среди отечественных ОС; наличие механизмов мандатного разграничения доступа; поддержка отечественных процессоров «Эльбрус»; развитая система технической поддержки. К недостаткам же можно отнести потенциальную сложность освоения для пользователей, привыкших к Windows, ограниченную поддержку некоторых периферийных устройств и необходимость адаптации специфического отраслевого программного обеспечения.

Alt Linux

Операционная система Alt Linux, разрабатываемая компанией «Базальт СПО», имеет существенные отличия от Astra Linux в технологическом плане. Главной особенностью данной ОС является использование независимого репозитория «Сизиф» – это собственное хранилище пакетов, развиваемое компанией с 2001 года. Это означает, что Alt Linux не зависит напрямую ни от одного из зарубежных дистрибутивов и полностью контролируется российскими разработчиками. Еще одной особенностью системы можно назвать использование пакетного менеджера apt с rpm-пакетами, что отличает ее от других решений.

Сертифицированная редакция «Альт СП» получила сертификат ФСТЭК России, подтверждающий соответствие ОС требованиям по защите средств виртуализации и контейнеризации [7]. Данная редакция предназначена для использования в государственных организациях, работающих с персональными данными и обрабатывающих конфиденциальную информацию. Сертифицированная версия устанавливается со специального сертифицированного носителя и требует соблюдения правил эксплуатации для поддержания статуса сертифицированной системы.

Экосистема Alt Linux включает различные редакции: Desktop для рабочих станций, Server для серверов, Education для образовательных учреждений. Система может работать с широким спектром прикладного ПО (офисные пакеты, СУБД, средства виртуализации). Репозиторий «Сизиф» содержит огромное количество пакетов, что обеспечивает большой выбор программного обеспечения для самых разных задач.

Преимуществами Alt Linux являются: независимый репозиторий, не привязанный к зарубежным дистрибутивам; длительная история развития и зрелость кодовой базы; наличие сертификата ФСТЭК; широкий выбор редакций под различные задачи. Недостатки: уровень сертификации ниже, чем у Astra Linux; необходимость обучения персонала работе с отличным от Windows интерфейсом; уровень сертификации не позволяет использовать систему для обработки сведений, содержащих государственную тайну.

РЕД ОС

Операционная система РЕД ОС, разрабатываемая компанией «Ред Софт», построена на базе CentOS/RHEL. В РЕД ОС используется пакетный менеджер rpm и система управления пакетами dnf/yum.

РЕД ОС сертифицирована в системе сертификации ФСТЭК России на соответствие требованиям профиля защиты операционных систем типа «А» четвертого класса защищенности. Сертификат подтверждает, что ОС обладает высокой степенью надежности и может защищать данные от несанкционированного доступа. Система доступна в нескольких конфигурациях (десктопная, серверная) и редакциях (стандартная, сертифицированная – для работы с конфиденциальной информацией).

РЕД ОС также совместима с различными офисными пакетами, системами управления базами данных, средствами виртуализации. Главным преимуществом РЕД ОС является то, что она построена на базе CentOS/RHEL. Это делает ее максимально понятной для системных администраторов и простой с точки зрения миграции. Использование знакомых инструментов позволяет сократить расходы на переобучение персонала.

Преимущества РЕД ОС: знакомая среда для администраторов с опытом работы с CentOS/RHEL; сертификат ФСТЭК; активное развитие и поддержка. Недостатки: уровень сертификации не позволяет использовать систему для обработки сведений, содержащих гостайну.

Сравнительный анализ отечественных операционных систем

По данным Strategy Partners за 2024 год, на российском рынке ОС сформировался устойчивый состав лидеров: «Группа Астра» удерживает долю 76 %, «Ред Софт» – 11 %, «Базальт СПО» – 10 %. Совокупная доля этих трех компаний достигает 97 % среди российских разработчиков ОС [8].

Astra Linux, построенная на базе Debian GNU/Linux, имеет ключевое преимущество – наивысший уровень сертификации: сертификаты ФСТЭК

(уровни КС2/КС3) и ФСБ России. Именно это позволяет использовать ее для обработки государственной тайны [6, с. 146]. Важную роль играет и поддержка отечественных процессоров «Эльбрус».

Alt Linux использует собственный независимый репозиторий «Сизиф», что обеспечивает технологическую независимость от зарубежных дистрибутивов. Сертифицированная редакция «Альт СП» имеет сертификат ФСТЭК для работы с персональными данными и конфиденциальной информацией, но уровень сертификации ниже, чем у Astra Linux.

РЕД ОС, построенная на базе CentOS/RHEL, сертифицирована ФСТЭК по профилю защиты типа «А» четвертого класса. Знакомая администраторам система управления пакетами dnf/rpm упрощает переход с зарубежных решений, но уровень сертификации не позволяет использовать РЕД ОС для обработки государственной тайны.

Заключение

По прогнозам Strategy Partners, к 2030 году объем рынка ОС достигнет 68 млрд рублей, а доля отечественных поставщиков составит 80 %. В государственном секторе уровень проникновения российских ОС будет близок к 100 %. Коммерческий сектор к 2030 году достигнет менее 50 % и сохранит потенциал для дальнейшего роста. Среднегодовой темп роста ожидается на уровне 16 % [8].

В результате исследования были проанализированы три отечественные ОС: Astra Linux, который лидирует с долей 76 % и имеет наивысший уровень сертификации, Alt Linux, отличающийся независимым репозиторием «Сизиф» и РЕД ОС, обеспечивающий плавный переход с зарубежных решений. Доля отечественных ОС выросла с 10 % в 2021 году до 55 % в 2024 году. К 2030 году государственный сектор приблизится к 100 % импортозамещению.

Список используемых источников

1. Черномырдин В. В., Шиян А. А. Анализ платформ обратной связи между гражданами и органами власти в рамках национального проекта «Цифровая экономика» // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании. X Международная научно-техническая и научно-методическая конференция: сб. науч. ст. в 4-х т. СПб.: СПбГУТ, 2021. Т. 2. С. 443-447.

2. Постановление Правительства Российской Федерации от 16.11.2015 г. № 1236 «Об установлении запрета на допуск иностранного программного обеспечения при закупках для государственных и муниципальных нужд» // Правительство России. URL: <http://government.ru/docs/all/104296/> (дата обращения: 21.03.2026).

3. Постановление Правительства Российской Федерации от 23.12.2024 г. № 1875 «О мерах по предоставлению национального режима при осуществлении закупок товаров, работ, услуг для обеспечения государственных и муниципальных нужд, закупок товаров, работ, услуг отдельными видами юридических лиц» // Правительство России. URL: <http://government.ru/docs/all/157130/> (дата обращения: 21.03.2026).

4. Указ Президента Российской Федерации от 30.03.2022 г. № 166 «О мерах по обеспечению технологической независимости и безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации» // Правительство России. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202203300001> (дата обращения: 21.03.2026).

5. Приказ ФСТЭК России от 25.12.2017 № 239 «Об утверждении Требований по обеспечению безопасности значимых объектов критической информационной инфраструктуры Российской Федерации» // Правительство России. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201803270041>. (дата обращения: 21.03.2026).

6. Орлов Н. Г., Борисов С. Д., Мальковский Т. А. Импортозамещение программного обеспечения в государственном секторе // Цифровые инструменты обеспечения устойчивого развития экономики и образования: новые подходы и актуальные проблемы: сб. науч. тр. IV-й Нац. науч.-практ. конф. (с междунар. участием) (Орел, 23 апреля 2025 г.). Орел: Изд-во РАНХиГС, 2025. С. 143-149.

7. Сертификат соответствия № 3866 от 10.08.2018 г. на операционную систему «Альт 8 СП» // «Базальт СПО». URL: https://www.basealt.ru/fileadmin/user_upload/sertifikat_3866.pdf (дата обращения: 21.03.2026).

8. Операционные системы (рынок России) // TAdviser: Государство. Бизнес. Технологии. URL: <https://goo.su/CKTwJlV> (дата обращения: 21.03.2026).

Статья представлена научным руководителем, кандидатом технических наук, доцентом кафедры информатики и компьютерного дизайна СПбГУТ Б. А. Аль-Нами.

PROSPECTS OF IMPORT SUBSTITUTION OF OPERATING SYSTEMS IN THE PUBLIC SECTOR OF THE RUSSIAN FEDERATION

Shiyan A., Ustinov M.

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

This article discusses the current problems and prospects of import substitution of operating systems in the public sector of the Russian Federation. A comparative analysis of three leading domestic operating systems is carried out: Astra Linux, Alt Linux and RED OS. The paper examines the technological base of each system, the certification levels of the FSTEC and the Ministry of Defense, the ecosystem of application software, and identifies the advantages and disadvantages of each solution. The regulatory framework governing the import substitution process has been analyzed, including the national program "Digital Economy of Russia" and the relevant orders of the Ministry of Finance. Based on the conducted research, conclusions are formulated about the prospects for the development of domestic software in the public sector for the next three to five years.

Key words: import substitution, operating system, public sector, FSTEC, Astra Linux, Alt Linux, RED OS, software, digital economy, information security

УДК 004.8:658.58

ГРНТИ 50.43.19

МОДЕЛИРОВАНИЕ АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ ПРОГНОСТИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ СЕТЕВОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПРИ ПОМОЩИ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Г. А. Целоусов

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Традиционные методы технического обслуживания – ремонт неисправностей по факту наступления и планово-предупредительные работы – неизбежно приводят к простоям сетевого и иного оборудования и, как следствие, финансовым издержкам. В противоположность им, прогностическое обслуживание подразумевает анализ исторических данных о функционировании оборудования для прогнозирования отказов до их наступления. Предлагается модель системы, обрабатывающая данные телеметрии при помощи методов машинного обучения. Для адаптации к изменениям модель должна непрерывно обучаться с использованием байесовского обновления.

искусственный интеллект, остаточный ресурс, регрессия, байесовское обновление

Современному технологическому оборудованию, такому как станки с числовым программным управлением, роботизированные комплексы, турбины, свойственны высокие сложность и стоимость. Выход подобного оборудования из строя может приводить к последствиям различного масштаба, от финансовых убытков и репутационных потерь до техногенных катастроф.

Любое оборудование подвержено износу и, как следствие, подлежит техническому обслуживанию с целью выявления неисправностей и слабых мест, замене расходных материалов и пр.

Существуют две традиционные стратегии технического обслуживания:

1. Реактивное (аварийный ремонт) – обслуживание оборудования по достижении отказа;
2. Планово-предупредительное (превентивное) – обслуживание согласно определенному заранее графику [1].

Оба варианта имеют критические недостатки. Реактивный подход подразумевает высокие затраты на срочный ремонт, вызванные простоями приво-

дят к еще большим финансовым потерям, а также вероятны снижение срока службы оборудования и риски безопасности. Превентивный подход представляет собой систематический комплекс процедур для поддержания работоспособности оборудования и тем самым предполагает избежание ситуаций выхода из строя. В данном случае основные затраты исходят из необходимости проведения регулярных работ по диагностике, регулировке и замене расходных материалов с определенным интервалом (месяц, год) вне зависимости от наличия или отсутствия неполадок.

Развитие концепции «Индустрия 4.0» приводит к появлению и внедрению в промышленность множества новых решений, основанных на использовании современных технологий и инструментов, каковыми являются интернет вещей (IoT, Internet of Things), искусственный интеллект. Одним из важных направлений является стратегия прогностического обслуживания.

Популярность данного направления обусловлена тем фактом, что при использовании классических подходов, описанных выше, затраты на техническое обслуживание, например, в сфере тяжелой промышленности, могут достигать половины от общих расходов.

Применение технологий искусственного интеллекта наряду с иными методами подробно рассматривается в исследовании [2]. Такой подход может значительно снизить уровень расходов за счет раннего обнаружения потенциальных неисправностей на основе изменений различных характеристик функционирования оборудования. Проведение технического обслуживания на основе прогноза модели ИИ заключается в использовании исторических данных телеметрии для анализа текущего состояния экземпляра оборудования. Согласно обзорному исследованию [3] долговечность и эффективность работы оборудования могут быть значительно улучшены благодаря использованию нейронных сетей и других методов машинного обучения в системах прогнозирования отказов.

Для успешного функционирования на протяжении длительного времени система прогнозирования должна адаптироваться к изменяющимся условиям: данные телеметрии оборудования могут претерпевать изменения как в долгосрочной перспективе (от износа), так и мгновенно в случаях замены расходников, ремонта неисправных узлов или замены на новые. В исследовании [4] предлагается непрерывное обучение моделей предиктивного обслуживания, а Койбагаров и др. в рамках своей работы [5] разработали модель с использованием байесовского обновления для адаптации к новым условиям.

Для прогнозирования поломок в работе используется вариационный автокодировщик (VAE, Variational AutoEncoder) с байесовскими методами, создающий вероятностную модель данных. Четко описаны преимущества данного подхода.

Кодирующая часть VAE сжимает данные в параметры вероятностного распределения и определяется как:

$$q_{\phi}(z|x) \sim N(\mu(x), \sigma^2(x))$$

где z – вектор скрытых переменных, x – исходные данные.

Декодировщик, в свою очередь, восстанавливает исходные данные из вектора скрытых переменных.

VAE дает вероятностное распределение скрытых признаков, что позволяет учитывать неопределенности на этапе извлечения признаков.

Адаптация упомянутой выше системы к новым условиям проводится за счет байесовского обновления вероятностей.

$$P(A|B) = P(B|A) \frac{P(A)}{P(B)},$$

где $P(A|B)$ – вероятность гипотезы A , когда событие B уже произошло.

$P(B|A)$ – вероятность события B при условии, что гипотеза A истинна.

$P(A)$ – исходная вероятность истинности гипотезы A до получения данных B .

$P(B)$ – общая вероятность события B .

Для прогнозирования остаточного ресурса (RUL, Remaining Useful Life) оборудования применяется линейная регрессия:

$$y = \omega_0 + \sum \omega_i z_i$$

где y – прогноз остаточного ресурса, z – скрытые признаки, полученные от кодировщика VAE, ω – коэффициенты линейной регрессии.

В настоящей статье предлагается распространить использование байесовского обновления вероятности на модель регрессии. В случае использования классической регрессии адаптация к новым условиям функционирования представляла бы собой следующую последовательность действий:

1. Поступление нового факта (отказа, ремонта, пр.);
2. Переобучение;
3. Проверка качества;
4. Замена модели.

При использовании байесовской регрессии при поступлении нового факта требуется лишь применение формул байесовского обновления весов.

В данном подходе параметры ω будут являться уже не фиксированными весами, а распределениями вероятностей. За начальное предположение взято нормальное распределение весов регрессии.

$$\omega \sim N(\mu, \sigma^2)$$

В таблице 1 описано, как происходит адаптация модели к различным видам входящих фактов.

ТАБЛИЦА 1. Адаптация модели к новым фактам

Событие	Действие модели
Ремонт или замена расходных материалов	Частичный сброс неопределенности, дисперсия весов увеличивается
Внезапный отказ	Сильное обновление с уменьшением прогнозируемого RUL, среднее сдвигается
Замена экземпляра оборудования	Полный сброс к начальному распределению

Так как теперь каждый вес представлен распределением вероятности, сам результат регрессии (остаточный ресурс) также перестает быть числом, а уравнение регрессии принимает вид:

$$\begin{aligned}\mu_{RUL} &= \mu_0 + \sum \mu_i z_i \\ \sigma_{RUL}^2 &= \sigma_0^2 + \sum \sigma_i^2 z_i^2\end{aligned}$$

Линейная комбинация независимых нормальных распределений весовых коэффициентов в результате дает нормальное распределение остаточного ресурса.

Итоговые значения RUL представляют собой нормальные распределения, которые можно интерпретировать следующим образом: оборудование выйдет из строя в промежутке времени $\mu_{RUL} \pm \sigma_{RUL}$ с вероятностью 68 % и в промежутке $\mu_{RUL} \pm 2\sigma_{RUL}$ с вероятностью 95 %. Значения 68 % и 95 % получены из свойств нормального распределения.

Предлагаемый подход позволяет перейти от точечного прогноза («Станок сломается через 48 часов») к вероятностному («С вероятностью 95 % до поломки осталось от 36 до 60 часов»). В данном примере, если поломка слу-

чилась через 40 часов, точечная модель ошиблась, а для вероятностной модели событие произошло внутри доверительного интервала. Таким образом, система не выдает ложной уверенности.

Также доверительные интервалы можно успешно использовать для управления рисками, к примеру, в задачах планирования остановок оборудования и сверхурочных работ, заказа комплектующих. Возможна интеграция прогноза модели в матрицу рисков для оценки последствий.

Схема предлагаемой архитектуры представлена на рис. 1.

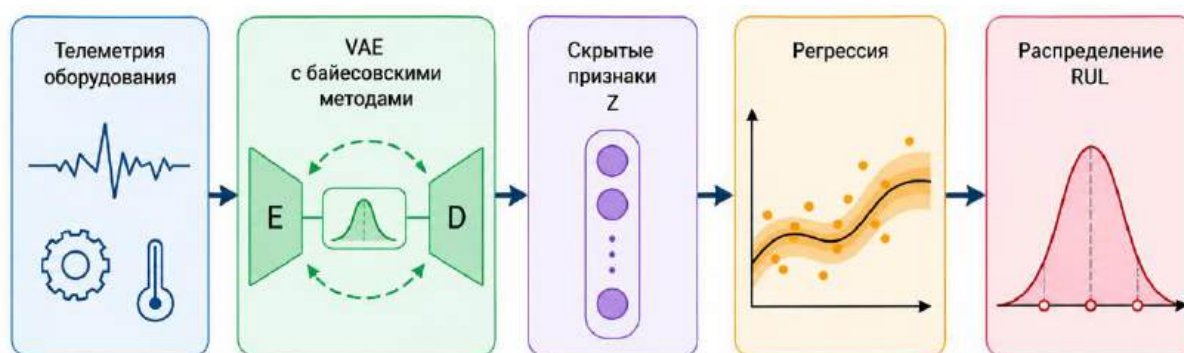


Рис. 1. Архитектура модели

Модель предполагает разделение адаптации на два уровня:

1. Быстрый – веса регрессии обновляются после каждого нового события (отказа, ремонта и пр.);
2. Медленный – автокодировщик переобучается периодически (ежемесячно, ежеквартально), а также при обнаружении дрейфа распределения входных данных.

Уровни предназначены для разных временных масштабов. В отличие быстрого обновления весов регрессии переобучение автокодировщика является более затратным по времени и ресурсам, а также подразумевает получение новых скрытых признаков и, как следствие, переобучение регрессии, в связи с чем выполняется реже.

Описанная модель имеет ряд ограничений:

- Предполагается нормальность распределения скрытых признаков, что может быть неадекватно для данных со сложной структурой;
- Регрессия линейна, чего может быть недостаточно для сильно нелинейных процессов. Использование других моделей возможно, но вероятно приведет к отсутствию сопряженности распределений и более высокой сложности модели и дороговизне вычислений;
- В отсутствие начальных данных исторических отказов на начальном этапе качество прогнозов будет низким.

В данной статье предложена адаптивная модель системы прогностического обслуживания. Интеграция ML, IoT и аналитики в реальном времени позволяет проактивно выявлять сбои. Практическая значимость заключается в возможности использования предлагаемой модели в реальных системах для снижения эксплуатационных затрат, повышения надежности оборудования, а также в сокращении трудозатрат инженерного персонала за счет автоматизации процессов диагностики и планирования технического обслуживания.

Разработка и реализация систем предиктивного обслуживания на основе машинного обучения станут важным шагом на пути к цифровизации сетевого и промышленного сектора и воплощению концепции «Индустрия 4.0».

Список используемых источников

1. Цыплов. Е. А., Хайитов Х. О., Новиков В. А., Глашкина В. С. Основные шаги в техническом обслуживании оборудования // Форум молодых ученых. 2020. №10 (50). С. 728–733.
2. Hiranmoy S. AI Based PDM in Manufacturing Industry 4.0: A Bibliographic Review / Hiranmoy. S. [и др.]. // International journal of engineering research & technology. 2024. № 13 (4).
3. Islam M. R. Deep Learning and Computer Vision Techniques for Enhanced Quality Control in Manufacturing Processes / Islam M. R. [и др.]. // Journal of IEEE Access. 2024. № 12. С. 121449–121479.
4. Nunes P. Challenges in predictive maintenance – A review / Nunes P., Santos J., Rocha E. // CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. 2023. № 40. С. 53–67
5. Койбагаров М. К., Исабеков Ж. Н., Курмангалиева Л. А., Байтурганова В. К., Рахметова П. М. Разработка системы предиктивного обслуживания на основе машинного обучения // Вестник университета Шакарима. Технические науки. 2025. № 2 (18). С. 121–128.

Статья представлена научным руководителем, доцентом кафедры ПИиВТ СПбГУТ, кандидатом технических наук, доцентом И. Б. Бондаренко.

ADAPTIVE SYSTEM DESIGN FOR PREDICTIVE MAINTENANCE OF NETWORK EQUIPMENT USING MACHINE LEARNING TECHNIQUES

Tselousov G.

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

Traditional maintenance methods, such as reactive and preventive, inevitably lead to a downtime of network and other equipment, that may result in financial costs. In contrast, predictive maintenance involves an analysis of historical data on equipment functioning to predict failures before they occur. A predictive maintenance model proposed handles telemetry data using machine learning techniques. To adapt to changes of conditions model should be continuously trained using Bayesian update allowing more accurate real-time forecasts as data becomes available.

Key words: artificial intelligence, remaining useful life, regression, Bayesian update

АВТОРЫ СТАТЕЙ

- АБРАМОВА
Нина Ивановна научный сотрудник научно-исследовательского центра Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного
NIAbram@yandex.ru
- АВДЯКОВ
Владимир Алексеевич кандидат технических наук, доцент кафедры электроники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, avdyakov.va@sut.ru
- АКИМОВ
Сергей Викторович кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры систем автоматизации и робототехники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, akimov.sv@sut.ru
- АКОПЬЯН
Карэн Арсэнович студент группы МПИ-2511 Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, akopyan.ka@sut.ru
- АЛЕКСЕЕВ
Александр Борисович кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры высшей математики Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, alekseev.ab@sut.ru
- АЛЕКСЕЕВ
Артем Игоревич аспирант кафедры электрической связи Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I, alekseevartem.ig@gmail.com
- АЛЬ-НАМИ
Башер Али кандидат технических наук, доцент кафедры информатики и компьютерного дизайна Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, al-nami.baa@sut.ru

АНДРЕЕВА Елена Ивановна	кандидат физико-математических наук, доцент кафедры оптических и квантовых систем связи Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, andreeva.elena@sut.ru
АНТИПИН Борис Маврович	кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры цифрового телевидения и метрологии Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, antipin.bm@sut.ru ,
БАГАЕВ Егор Сергеевич	аспирант кафедры беспроводных технологий и систем Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, bagaev.es@sut.ru
БАРЫШНИКОВ Николай Владимирович	кандидат технических наук, доцент, ведущий специалист по информационным технологиям ПАО «Интелтех», Baryshnikovnv@inteltech.domain
БАТЕНКОВ Кирилл Александрович	доктор технических наук, профессор, профессор кафедры автоматизации систем вычислительных комплексов Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, pustur@yandex.ru
БАЧАГОВ Иван Сергеевич	аспирант кафедры цифрового телевидения и метрологии Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, luntzero@sut.ru
БЕЛАЯ Татьяна Иоанновна	кандидат технических наук, доцент кафедры программной инженерии и вычислительной техники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, belaya.ti@sut.ru
БЕЛОВ Максим Алексеевич	студент группы МСТ-2561 Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, belov.ma@sut.ru
БЕЛОУС Константин Владимирович	кандидат технических наук, доцент кафедры систем автоматизации и робототехники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, bk@sut.ru

- БЕРЁЗКИН кандидат технических наук, доцент кафедры
Александр Александрович программной инженерии и вычислительной техники
Санкт-Петербургского государственного
университета телекоммуникаций
им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, berezkin.aa@sut.ru
- БИРЮКОВ кандидат технических наук, доцент кафедры
Михаил Александрович программной инженерии и вычислительной техники
Санкт-Петербургского государственного
университета телекоммуникаций
им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, birukov.ma@sut.ru
- БОГДАНОВА аспирант кафедры линий связи и измерений
Екатерина Игоревна в технике связи Поволжского государственного
университета телекоммуникаций и информатики,
ei.bogdanova@psuti.ru
- БОНДАРЕНКО кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры
Игорь Борисович информационных управляющих систем, доцент
кафедры программной инженерии и вычислительной
техники Санкт-Петербургского государственного
университета телекоммуникаций
им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, bondarenko.ib@sut.ru
- БОРИСОВ аспирант кафедры радиотехники Санкт-
Максим Геннадьевич Петербургского государственного университета
телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича,
borisov.mg@sut.ru
- БОРИСОВ кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры
Сергей Викторович электроники Санкт-Петербургского
государственного университета телекоммуникаций
им. проф. М. А. Бонч-Бруевича,
k112_electron@sut.ru
- БОРИСОВА студент группы МБК-2581 Санкт-Петербургского
Анжелика Артуровна государственного университета телекоммуникаций
им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, borisova1.aa@sut.ru
- БОРОВСКИХ выпускник Санкт-Петербургского государственного
Максим Сергеевич университета телекоммуникаций им. проф.
М. А. Бонч-Бруевича по направлению бакалавриата
09.03.04 «Программная инженерия»,
maximanmax@gmail.com (borovskih.ms@sut.ru)
- БУРМИСТРОВ студент группы МПИ-2511 Санкт-Петербургского
Николай Андреевич государственного университета телекоммуникаций
им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, burmistrov.na@sut.ru

БУЧАТСКИЙ Александр Николаевич	кандидат технических наук, доцент кафедры цифрового телевидения и метрологии, директор института магистратуры Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича abuchatsky@sut.ru
БЫКОВА Любовь Евгеньевна	студент группы МБК-2581 Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, bykova.le@sut.ru
БЫЛИНА Мария Сергеевна	кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой оптических и квантовых систем связи Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, bylina.maria@sut.ru
ВАХНЮК Кирилл Денисович	лаборант учебной лаборатории кафедры оптических и квантовых коммуникаций Московского технического университета связи и информатики, k.d.vahnyuk@mtuci.ru
ВЕРХОВА Галина Викторовна	доктор технических наук, профессор, профессор кафедры систем автоматизации и робототехники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, verkhova.gv@sut.ru
ВЕРШИНИНА Ксения Витальевна	аспирант кафедры сетей связи и передачи данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, vershinina.kv@sut.ru
ВИКУЛОВ Антон Сергеевич	кандидат технических наук, доцент кафедры сетей связи и передачи данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, vikulov.as@sut.ru
ВИНОГРАДОВ Евгений Михайлович	кандидат технических наук, доцент, инженер 1 категории НИЛ радиоконтроля и электромагнитной совместимости Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, vinogradov.em@sut.ru
ВЛАДИМИРОВ Сергей Сергеевич	доктор технических наук, доцент, профессор кафедры сетей связи и передачи данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, vladimirovs@sut.ru

- ВЛАДЫКО кандидат технических наук, доцент, декан
Андрей Геннадьевич факультета радиоэлектронных систем
и робототехники Санкт-Петербургского
государственного университета телекоммуникаций
им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, vladyko@sut.ru
- ВОЛОГИН ведущий системный аналитик ПАО «Интелтех»,
Сергей Геннадьевич Vologinsg@inteltech.domain
- ВОЛОСТНЫХ кандидат военных наук, доцент, научный сотрудник
Виктор Анатольевич научно-исследовательского центра Военной
академии связи им. Маршала Советского Союза
С. М. Буденного, ra1alo@mail.ru
- ВОЛЫНКИН кандидат технических наук, доцент кафедры систем
Павел Александрович автоматизации и робототехники Санкт-
Петербургского государственного университета
телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича,
volynkin.pa@sut.ru
- ВОРОБЬЕВ научный сотрудник научно-исследовательского
Павел Владимирович центра Военной академии связи им. Маршала
Советского Союза С. М. Буденного, gsg.1991@mail.ru
- ВОРОНЧУК преподаватель Военной академии связи им. Маршала
Виктор Иосифович Советского Союза С. М. Буденного,
sprintsb@mail.ru
- ВОСКРЕСЕНСКИЙ студент группы МБК-2581 Санкт-Петербургского
Евгений Алексеевич государственного университета телекоммуникаций
им. проф. М. А. Бонч-Бруевича,
voskresenskii.ea@sut.ru
- ВУ аспирант кафедры радиотехники Санкт-
Тхе Зует Петербургского государственного университета
телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича,
vu.tz@sut.ru
- ГАЛКИНА доцент кафедры прикладной математики
Марина Юрьевна и кибернетики Сибирского государственного
университета телекоммуникаций и информатики,
gmur7@sibguti.ru
- ГАХ студент группы ИСТ-362 Санкт-Петербургского
Кирилл Николаевич государственного университета телекоммуникаций
им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, gakh.kn@sut.ru

- ГВОЗДКОВ** Игорь Вячеславович старший преподаватель кафедры систем обработки данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, gvozdkov.iv@sut.ru
- ГЛАГОЛЕВ** Сергей Федорович кандидат технических наук, доцент кафедры оптических и квантовых систем связи, старший научный сотрудник Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, Glagolev.Sergey@sut.ru
- ГЛАДКИХ** Дмитрий Сергеевич младший научный сотрудник научно-исследовательского центра Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного, mr.zid2004@mail.ru
- ГЛУШАНКОВ** Евгений Иванович доктор технических наук, профессор, профессор кафедры радиотехники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, glushankov.ei@sut.ru
- ГОРОБЦОВ** Илья Александрович старший преподаватель кафедры конструирования и производства радиоэлектронных средств Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, gorobcov.ia@sut.ru
- ГОРОХОВ** Дмитрий Геннадьевич студент группы МКТ-2511 Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, gorohov.dg@sut.ru
- ГУБИН** Александр Николаевич кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры информационных управляющих систем Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, gubin.an@sut.ru
- ГУМИНСКИЙ** Олег Андреевич аспирант кафедры цифрового телевидения и метрологии Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, guminskii.oa@sut.ru
- ДАВЫДОВ** Вадим Владимирович доктор физико-математических наук, профессор кафедры оптических и квантовых систем связи Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, ведущий инженер центра новых материалов Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, davydov.vadim@sut.ru

ДАВЫДОВА старший преподаватель кафедры информационных
Екатерина Викторовна управляющих систем Санкт-Петербургского
государственного университета телекоммуникаций
им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, davydova.ev@sut.ru

ДАНИЛИН инженер-проектировщик ООО «Газинформсервис»,
Герман Владиславович t.101@mail.ru

ДАШКОВ кандидат технических наук, доцент, заведующий
Михаил Викторович кафедрой линий связи и измерений в технике связи
Поволжского государственного университета
телекоммуникаций и информатики,
m.dashkov@psuti.ru

ДЕНИСОВА кандидат физико-математических наук, инженер-
Анастасия Александровна программист машинного обучения
ООО «Датаджайл», a.denisova75@yandex.ru

ДЕНИСОВА младший научный сотрудник лаборатории 235
Елена Артемовна «Радио- и оптоэлектронных приборов ранней
диагностики заболеваний человека» Института
аналитического приборостроения РАН,
tiranderel@yandex.ru

ДЕНИСОВА старший преподаватель кафедры систем обработки
Юлия Вячеславовна данных Санкт-Петербургского государственного
университета телекоммуникаций им. проф.
М. А. Бонч-Бруевича, denisova.uv@sut.ru

ДМИТРИЕВА кандидат физико-математических наук, доцент,
Оксана Михайловна доцент кафедры высшей математики Санкт-
Петербургского государственного университета
телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича,
dmitrieva.om@sut.ru

ДОМБРОВСКИЙ начальник научно-исследовательского отдела
Ярослав Аркадьевич (организации инновационной деятельности и оценки
качества образовательного процесса) Военной
орденов академии связи им. Маршала Советского
Союза С. М. Буденного, shchuk@rambler.ru

ДОРОЖКИН руководитель группы ООО «Т8 НТЦ»,
Алексей Николаевич dorozkin@t8.ru

ДОЦЕНКО аспирант кафедры оптических и квантовых систем
Сергей Эдуардович связи Санкт-Петербургского государственного
университета телекоммуникаций им. проф.
М. А. Бонч-Бруевича, dotsenko.sergey@sut.ru

- ДЮБОВ** кандидат технических наук, доцент кафедры
Андрей Сергеевич оптических и квантовых систем связи Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, dubov.andrey@sut.ru
- ЕВТУШЕНКО** аспирант кафедры линий связи и измерений
Александр Сергеевич в технике связи Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики, a.evtushenko@psuti.ru
- ЕЛАГИН** кандидат технических наук, и. о. декана факультета
Василий Сергеевич инфокоммуникационных сетей и систем, доцент кафедры инфокоммуникационных систем Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, v.elagin@sut.ru
- ЕРОФЕЕВ** студент группы ИКМ-43з Санкт-Петербургского
Алексей Дмитриевич государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, erofeev.ad@sut.ru
- ЖАРАНОВА** старший преподаватель кафедры информационных
Анастасия Олеговна управляющих систем Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, zharanova.ao@sut.ru
- ЗАДБОВ** младший научный сотрудник Военной академии
Вадим Александрович связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного, zadboev89@mail.ru
- ЗАЙЦЕВА** кандидат технических наук, доцент кафедры
Екатерина Викторовна информатики и компьютерных технологий Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II, zaytseva_ev@pers.spmi.ru
- ЗАЙЦЕВА** кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры
Зинаида Викторовна электроники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, zaitch@sut.ru
- ЗАКИРОВ** кандидат технических наук, доцент кафедры физики
Ильдар Илюсович Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, fizika.ffp@sut.ru

- ЗЛОБИН Олег Николаевич студент группы ИСТ-441м Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, zlobin.on@sut.ru
- ИБРАГИМОВ Роман Захирович доцент кафедры оптических и квантовых коммуникаций Московского технического университета связи и информатики, r.z.ibragimov@mtuci.ru
- ИБРАГИМОВ Руслан Сергеевич студент группы РК-41м Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, rus_ibr_s@mail.ru
- ИВАНОВ Александр Филиппович студент группы БИН2501 Московского технического университета связи и информатики, aleksandrivanov20208@gmail.com
- ИГУМЕНОВ Александр Юрьевич кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры общей физики, ведущий инженер отдела интеграции телекоммуникационных решений Московского физико-технического института, инженер-исследователь ООО «Т8», igumenov.au@mipt.ru
- ИСУПОВА Екатерина Васильевна аспирантка кафедры оптических и квантовых систем связи Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, isupova.ev@sut.ru
- КАМАРТИНА Наталия Михайловна кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры высшей математики Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, kamartina.nm2002@sut.ru
- КАНАЕВ Андрей Константинович доктор технических наук, профессор кафедры электрической связи Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I, kanaev@pgups.ru
- КАЧНОВ Андрей Владимирович аспирант кафедры цифрового телевидения и метрологии Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, kachnov.av@sut.ru
- КИМ Злата Валерьевна студент группы ИКПИ-24 Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, kim.zv@sut.ru

- КИЯМОВ студент группы МПИ-2511 Санкт-Петербургского
Айрат Олегович государственного университета телекоммуникаций
им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, kiiamov.ao@sut.ru
- КНЯЗЕВ специалист 1 категории ООО «Т8 НТЦ»,
Олег Юрьевич студент группы РЛ2-82Б Московского
государственного технического университета
им. Н. Э. Баумана, kniazev.oyu@t8.ru
- КОВАЛГИН заслуженный деятель науки РФ, доктор технических
Юрий Алексеевич наук, профессор, профессор кафедры цифрового
телевидения и метрологии, Почетный профессор
Санкт-Петербургского государственного
университета телекоммуникаций им. проф.
М. А. Бонч-Бруевича, kowalgin@sut.ru
- КОЖАНОВ кандидат технических наук, доцент кафедры
Юрий Федорович инфокоммуникационных систем Санкт-
Петербургского государственного университета
телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича,
kozhanov.uf@sut.ru
- КОЗЛОВА кандидат технических наук, доцент кафедры
Людмила Петровна информационных управляющих систем Санкт-
Петербургского государственного университета
телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича,
kozlova.lp@sut.ru
- КОЗЛОВА старший преподаватель кафедры информационных
Ольга Александровна управляющих систем Санкт-Петербургского
государственного университета телекоммуникаций
им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, kozlova.oa@sut.ru
- КОЛЕСНИКОВ кандидат технических наук, декан факультета
Олег Вячеславович «Сетевая инженерия», заведующий кафедрой
«Оптические и квантовые коммуникации»
Московского технического университета связи
и информатики, o.v.kolesnikov@mtuci.ru
- КОЛОСЬКО кандидат физико-математических наук, доцент
Анатолий Григорьевич кафедры конструирования и производства
радиоэлектронных средств Санкт-Петербургского
государственного университета телекоммуникаций
им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, старший научный
сотрудник Физико-технического института
им. А. Ф. Иоффе РАН, agkolosko@mail.ru,
kolosko.ag@sut.ru

КОЛПАКОВ Дмитрий Ильич	студент группы ИСТ-431 Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, kolpakov.di@sut.ru
КОЛПАКОВ Станислав Владиславович	студент группы ИКТФ-46м Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, kolpakov.sv@sut.ru
КОНСТАНТИНОВ Егор Сергеевич	аспирант кафедры цифрового телевидения и метрологии Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, konstantinov.es@sut.ru
КОРЖИК Валерий Иванович	доктор технических наук, профессор, Заслуженный работник высшей школы РФ, профессор кафедры защищенных систем связи Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, korzhik.vi@sut.ru
КОРЗУН Владислав Алексеевич	студент ИНО Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, korzun.va@sut.ru
КОРОБЕЙНИКОВ Александр Николаевич	студент группы ФП-41м Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, korobeinikov.an@sut.ru
КОРОВИН Константин Олегович	кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой радиотехники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, korovin.ko@sut.ru
КОРОТИН Владимир Евгеньевич	кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры беспроводных технологий и систем Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, korotin.ve@sut.ru
КОРОТЧЕНКО Владислав Дмитриевич	аспирант кафедры электрической связи Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I, vladis147@mail.ru

КОСТЕЛЬЦЕВА Ульяна Андреевна	студент группы МПИ-2511 Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, kosteltseva.ua@sut.ru
КРАВЕЦ Елена Валентиновна	кандидат технических наук, доцент кафедры беспроводных технологий и систем Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, kravec.ev@sut.ru
КРЫЛОВ Степан Евгеньевич	аспирант кафедры сетей связи и передачи данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, krylov.se@sut.ru
КУЖЛЕВ Максим Юрьевич	студент группы ИСТ-441м Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, kuzhlev.mu@sut.ru
КУЗЬМИНА Дарья Денисовна	аспирант кафедры цифрового телевидения и метрологии Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, kuzmina.dd@sut.ru
КУРАКИН Федор Павлович	студент группы МПИ-2512 Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, kurakin.fp@sut.ru
КУРАШЕВ Заур Валерьевич	кандидат технических наук, начальник лаборатории ФГБУ 16 ЦНИИИ Министерства обороны РФ, frankilou@yandex.ru
КУТЕВ Максим Андреевич	студент группы К950 Санкт-Петербургского колледжа телекоммуникаций им. Э. Т. Кренкеля Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, kutev.ma@sut.ru
КУШНИР Андрей Ростиславович	студент группы ИСТ-223 Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, cuckop30@gmail.com
ЛАБКОВСКАЯ Римма Яновна	кандидат технических наук, доцент кафедры информационных управляющих систем Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, labkovskaia.ria@sut.ru

- ЛАНДА кандидат технических наук, доцент,
Александр Эдуардович доцент кафедры электроники Санкт-Петербургского
государственного университета телекоммуникаций
им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, landa.ae@sut.ru
- ЛАПТЕВА аспирант кафедры сетей связи и передачи данных
Татьяна Владимировна Санкт-Петербургского государственного
университета телекоммуникаций им. проф.
М. А. Бонч-Бруевича lapteva.tv@sut.ru
- ЛАПШИН аспирант кафедры защищенных систем связи Санкт-
Алексей Сергеевич Петербургского государственного университета
телекоммуникаций
им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, lapshin1.as@sut.ru
- ЛАРЬКОВ инженер, сотрудник ООО «Т8 НТЦ», larkov@t8.ru
Дмитрий Анатольевич
- ЛЕВШУН кандидат технических наук, PhD-CS, доцент кафедры
Дмитрий Сергеевич информационной безопасности компьютерных сетей
Санкт-Петербургского государственного
университета телекоммуникаций им. проф.
М. А. Бонч-Бруевича, levshun.d@sut.ru
- ЛЕЙКИН старший преподаватель кафедры
Антон Владиславович инфокоммуникационных систем Санкт-
Петербургского государственного университета
телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича,
aleykin@sut.ru
- ЛИМАНЦЕВА адъюнкт кафедры автоматизированных систем
Елена Владимировна специального назначения Военной академии связи
им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного,
lena.limantseva@mail.ru
- ЛИТВИНОВ кандидат технических наук, доцент, заведующий
Владислав Леонидович кафедрой информационных управляющих систем
Санкт-Петербургского государственного
университета телекоммуникаций им. проф.
М. А. Бонч-Бруевича, vlitvinov@sut.ru
- ЛОСЕВ аспирант кафедры цифрового телевидения
Арсений Павлович и метрологии Санкт-Петербургского
государственного университета телекоммуникаций
им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, losev.ap@sut.ru

- ЛЮБИМОВ** кандидат технических наук, доцент кафедры систем
Александр Геннадьевич автоматизации и робототехники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, Lubimov.ag@sut.ru
- ЛЯЩУК** кандидат технических наук, старший научный
Михаил Зиновьевич сотрудник научно-исследовательского центра Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного, HLAbram@yandex.ru
- МАКАРОВ** аспирант кафедры радиотехники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, makarov.va@sut.ru
- МАКАРОВ** кандидат технических наук, доцент кафедры систем
Леонид Михайлович автоматизации и робототехники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, makarov.lm@sut.ru
- МАКОЛКИНА** доктор технических наук, доцент, заведующий
Мария Александровна кафедрой инфокоммуникационных систем Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, makolkina.ma@sut.ru
- МАНГИРОВ** курсант факультета автоматизированных систем
Павел Владиславович управления Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного, pashastr1@mail.ru
- МАНИЛОВ** старший преподаватель кафедры высшей математики
Александр Николаевич Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, manilov.an@sut.ru
- МАРКОВ** ведущий инженер центра компетенций по
Руслан Михайлович направлению «Перспективные БАС и сервисы», ведущий инженер проектно-конструкторского бюро разработки космических технологий Московского физико-технического института, markov.rm@mipt.ru
- МАТВЕЕВ** аспирант кафедры сетей связи и передачи данных
Артем Сергеевич Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, matveev1.as@sut.ru

- МАТВЕЕВ студент группы ИСТ-411м Санкт-Петербургского
Павел Вадимович государственного университета телекоммуникаций
им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, matveev.pv@sut.ru
- МАТЮХИНА кандидат технических наук, доцент, заместитель
Татьяна Владимировна декана факультета радиоэлектронных систем и
робототехники по учебной работе Санкт-
Петербургского государственного университета
телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича,
rsr@sut.ru
- МЕДВЕДЕВ кандидат сельскохозяйственных наук, доцент
Сергей Алексеевич кафедры систем обработки данных Санкт-
Петербургского государственного университета
телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича,
medvedev1.sa@sut.ru
- МЕЛЬНИКОВ кандидат физико-математических наук, ведущий
Игорь Владимирович инженер отдела интеграции телекоммуникационных
решений, ассистент кафедры общей физики
Московского физико-технического института,
melnikov.iv@mipt.ru
- МЕНЬШИКОВ студент группы РК-41м Санкт-Петербургского
Глеб Константинович государственного университета телекоммуникаций
им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, menshikov.gk@sut.ru
- МЕРАЗГА аспирант кафедры сетей связи и передачи данных
Мохаммед Надхир Санкт-Петербургского государственного
университета телекоммуникаций им. проф.
М. А. Бонч-Бруевича, merazga.mn@sut.ru
- МЕЩЕРЯКОВ студент группы Р-42м Санкт-Петербургского
Данила Евгеньевич государственного университета телекоммуникаций
им. проф. М. А. Бонч-Бруевича,
mesheryakov.de@sut.ru
- МИХАЙЛОВ ассистент кафедры инфокоммуникационных систем
Василий Дмитриевич Санкт-Петербургского государственного
университета телекоммуникаций им. проф.
М. А. Бонч-Бруевича, mvd@sut.ru
- МИЦКЕВИЧ студент группы РК-41м Санкт-Петербургского
Анатолий Андреевич государственного университета телекоммуникаций
им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, mickiewicz.aa@sut.ru

МОЛОКОВ Даниил Антонович	инженер технической поддержки кафедры систем обработки данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, molokov.da@sut.ru
МОРОЗОВА Екатерина Антоновна	преподаватель кафедры цифрового телевидения и метрологии Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, morozova.ea@sut.ru
МОСЯКИН Денис Сергеевич	студент группы ИСТ-431 Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, mosiakin.ds@sut.ru
МОХОВА Анастасия Александровна	ассистент кафедры радиотехники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, mokhova.aa@sut.ru
МОШАК Николай Николаевич	доктор технических наук, доцент кафедры информационных управляющих систем Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, профессор кафедры информационной безопасности Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, moshak.nn@sut.ru
МУТХАННА Аммар Салех Али	доктор технических наук, профессор кафедры сетей связи и передачи данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, muthanna.asa@sut.ru
НГУЕН Суан Нгок	аспирант кафедры сетей связи и передачи данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, nguen.sn@sut.ru
НЕЕЛОВА Ольга Леонидовна	старший преподаватель кафедры программной инженерии и вычислительной техники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, neelova.ol@sut.ru
ЕНАШЕВ Тимофей Дмитриевич	специалист 1 категории ООО «Т8 НТЦ», студент НИЯУ Московский инженерно-физический институт, nenashev.td@t8.ru

НЕСТЕРОВ Олег Денисович	студент группы ИКТФ-46м Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, nesterov.od@sut.ru
НИКУЛИНА Татьяна Геннадьевна	кандидат технических наук, доцент кафедры линий связи и измерений в технике связи Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики, t.nikulina@psuti.ru
НОГИН Сергей Борисович	кандидат технических наук, доцент, старший преподаватель Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного, sprintnsb@mail.ru
ОКУНЕВА Александра Витальевна	студент группы ИКТУ-23 Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, okuneva.av@sut.ru
ОМАРОВ Эльдар Гаджиевич	студент группы ИСТ-223 Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, omarov.eg@sut.ru
ОСТРОУМОВА Юлия Сергеевна	доктор педагогических наук, доцент, заведующий кафедрой биологической и медицинской физики Военно-медицинской академии им. С. М. Кирова, sinklit@mail.ru
ПАВЛОВ Александр Сергеевич	студент группы МБК-2581 Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, pavlov1.as@sut.ru
ПАВЛОВ Федор Федорович	кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, fizika.ffp@sut.ru
ПАДЕРИН Михаил Владимирович	студент группы МПИ-2511 Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, paderin.mv@sut.ru
ПАНТЮХИН Олег Игоревич	кандидат технических наук, доцент кафедры сетей связи и передачи данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, pantuhin.oi@sut.ru

- ПАРАМОНОВ Александр Иванович доктор технических наук, профессор, профессор кафедры сетей связи и передачи данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, paramonov@sut.ru
- ПАРАЩУК Игорь Борисович доктор технических наук, профессор, Заслуженный изобретатель РФ, почетный работник сферы образования РФ, профессор кафедры автоматизированных систем специального назначения Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного, shchuk@rambler.ru
- ПАЧИН Андрей Владимирович кандидат технических наук, доцент кафедры программной инженерии и вычислительной техники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, pachin.andrej@bk.ru
- ПЕЛИН Артем Александрович адъюнкт кафедры общепрофессиональных дисциплин Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного, PelinVUC@yandex.ru
- ПЕРЕС-КАЛЬДЕРОН РОДРИГЕС Дарио Альфонсо кандидат технических наук, доцент кафедры цифрового телевидения и метрологии Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, peres.krda@sut.ru
- ПЕРЕВОЗНИК Юрий Яковлевич кандидат педагогических наук, доцент кафедры систем обработки данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, perevoznik.uy@sut.ru
- ПЕРЕЛЫГИН Сергей Васильевич кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры аудиовизуальных систем и технологий, доцент кафедры звукорежиссуры Санкт-Петербургского государственного института кино и телевидения, sergey.perelygin@gmail.com
- ПЕРОВА Наталья Константиновна младший научный сотрудник научно-исследовательского центра Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного, perova_nk@mail.ru

ПЕТРОВ Павел Сергеевич	аспирант кафедры оптических и квантовых систем связи Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, petrov.ps@sut.ru
ПИГАРЕВ Николай Дмитриевич	аспирант кафедры беспроводных технологий и систем Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, pigarev.nd@sut.ru
ПИЛИКИНА Елена Анатольевна	старший преподаватель кафедры систем автоматизации и робототехники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, pilikina.ea@sut.ru
ПЛОТНИКОВ Иван Павлович	студент группы ИКМ-41з Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, plotnikov.ip@sut.ru
ПЛОТНИКОВ Павел Владимирович	кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой высшей математики Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, plotnikov.pv@sut.ru
ПОЗДНЯКОВ Артём Андреевич	аспирант кафедры оптических и квантовых систем связи Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, pozdneyakov.aa@sut.ru
ПОЛЯКОВ Сергей Алексеевич	аспирант кафедры инфокоммуникационных систем Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, polyakov.sa@sut.ru
ПОПОВ Евгений Олегович	доктор физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Физико-технического института им. А. Ф. Иоффе РАН, e.popov@mail.ioffe.ru
ПОПУГАЕВ Даниил Георгиевич	студент группы ИСТ-261 Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, pdg@sut.ru
ПОТЕХИНА Анастасия Александровна	студент группы МСС-2571 Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, potehina.aa@sut.ru

- ПРАСОЛОВ** кандидат технических наук, доцент кафедры
Александр Александрович цифрового телевидения и метрологии Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, prasolov.aa@sut.ru
- ПРОВОДИН** аспирант Физико-механического института Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, provodindanya@gmail.com
- ПРОТАСЕНЯ** кандидат технических наук, доцент кафедры
Сергей Витальевич конструирования и производства радиоэлектронных средств Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, protasenya.sv@sut.ru
- ПРОХОРОВ** студент группы 3241302/40501 Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, prohorov2.da@edu.spbstu.ru
- ПУТИЛИН** доктор технических наук, профессор,
Алексей Николаевич главный специалист ПАО «Интелтех», Putilinan@inteltech.domain
- РАКОВСКИЙ** кандидат технических наук, доцент кафедры
Олег Владимирович информационных управляющих систем Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, rakovskii.ov@sut.ru
- РЕЗИНКИН** студент группы ИКТГ-44м Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, rezinkin.dv@sut.ru
- РОГОВ** доктор физико-математических наук, профессор
Сергей Александрович кафедры оптических и квантовых систем связи Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, rogov2.sa@sut.ru
- РОГОВА** студент группы МБК-2581, Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, rogova.ms@sut.ru
- РЫБАЧЕНКО** студент группы ИКТГ-44м Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, rybachenko.va@sut.ru
- Вячеслав Андреевич

- РЮТИН Константин Евгеньевич аспирант кафедры беспроводных технологий и систем Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, rutin.ke@sut.ru
- РЯБИКОВ Дмитрий Сергеевич аспирант кафедры беспроводных технологий и систем Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, ryabikov.ds@sut.ru
- САБИРОВ Денис Эдуардович соискатель кафедры робототехники и искусственного интеллекта Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного, sabirov1234@mail.ru
- САВИЩЕНКО Николай Васильевич доктор технических наук, профессор, профессор кафедры общепрофессиональных дисциплин Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного, snikaspb@mail.ru
- САЗОНОВ Виктор Викторович кандидат технических наук, доцент, докторант кафедры автоматизированных систем специального назначения Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного, vmktor-sazonov@yandex.ru
- САЛЕЕВ Александр Ринатович лаборант учебной лаборатории кафедры оптических и квантовых коммуникаций Московского технического университета связи и информатики, a.r.saleev@mtuci.ru
- САЯРКИН Леонид Андреевич адъюнкт Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного, leonid.sayarkin@yandex.ru
- СВИНЬИНА Ольга Андреевна старший преподаватель кафедры цифрового телевидения и метрологии Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, svinyina.oa@sut.ru
- СЕЛЕЗНЕВ Андрей Васильевич кандидат технических наук, начальник отдела военно-технической информации Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного, andrsel@mail.ru
- СИМОНОВ Илья Михайлович студент группы БИН2406 Московского технического университета связи и информатики, i.m.simonov@edu.mtuci.ru

СИНИЛЬНИКОВ Александр Михайлович	кандидат технических наук, главный инженер научно-технического центра спутниковых систем связи, радиомониторинга и вещания ФГАУ НИЦ Телеком им. М. И. Кривошеева, филиал в г. Санкт-Петербурге, sinilam01@gmail.com
СКАЖУТИН Артём Рудольфович	студент группы ИСТ-431 Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, skazhutin.ar@sut.ru
СМЫСЛОВ Илья Сергеевич	студент группы ИСТ-41 Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики, ei.bogdanova@psuti.ru
СОКОЛОВ Виктор Андреевич	ведущий инженер отдела интеграции телекоммуникационных решений Московского физико-технического института, sokolov.va@mipt.ru
СОКОЛОВ Сергей Сергеевич	доктор технических наук, профессор кафедры комплексного обеспечения информационной безопасности Государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова, sokolovss@gumrf.ru
СОЛОВЬЕВ Даниил Михайлович	студент группы МПИ-2512 Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, solovev.dm@sut.ru
СОПОВ Дмитрий Александрович	преподаватель кафедры беспроводных технологий и систем Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, sopov.da@sut.ru
СОСТИНА Варвара Михайловна	студент группы НГС-23-1 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II, varvara.sostina@gmail.com
СОЧНЕВ Игорь Владимирович	ведущий инженер ООО «ДЖИ ВИ ТЕК», Igor.v.sochnev@gmail.com
СТАРИКОВ Владимир Владимирович	старший преподаватель кафедры беспроводных технологий и систем Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, starikov.vv@sut.ru
СТЕПАНЯН Давид Арменакович	студент группы ИКПИ-24 Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, stepanyan.da@sut.ru

СТРЕЛЕЦ Константин Михайлович	студент группы ИСТ-262 Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, strelec.km@sut.ru
СУСЛОВ Алексей Алексеевич	студент группы ИСТ-411м Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, suslov.aa@sut.ru
ТАМБОВЦЕВ Глеб Ильич	аспирант кафедры систем автоматизации и робототехники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, tambovcev.gi@sut.ru
ТАРАСОВ Владимир Анатольевич	старший преподаватель кафедры информационных управляющих систем Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, tarasov.va@sut.ru
ТАТАРЕНКОВ Дмитрий Александрович	старший преподаватель кафедры цифрового телевидения и метрологии Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, tatarenkov.da@sut.ru
ТИХОМИРОВ Артём Андреевич	студент группы МБК-2581 Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, tihomirov.aa@sut.ru
ТИШКОВ Антон Олегович	ассистент кафедры беспроводных технологий и систем Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, tishkov.ao@sut.ru
ТКАЧЕВ Дмитрий Федорович	кандидат технических наук, начальник отдела научно-исследовательского центра Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного dimas.portnoy@inbox.ru
ТОЛМАЧЕВ Максим Александрович	аспирант кафедры оптических и квантовых систем связи Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, tolmachev.ma@sut.ru
ТРУХИН Виталий Анатольевич	аспирант кафедры инфокоммуникационных систем Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, truhin.va@sut.ru

УЛАСИК Вероника Валерьевна	студент группы ИСТ-261 Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, ulasik.vv@sut.ru
УРОКОВ Антон Дилшодович	аспирант кафедры радиотехники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, urokov.ad@sut.ru
УСС Владимир Станиславович	кандидат технических наук, доцент, и. о. заведующего кафедрой систем автоматизации и робототехники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, uss.vs@sut.ru
УСТИНОВ Максим Витальевич	студент группы ИВТ-2511 Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, ustinov.mv@sut.ru
ФАМ Ван Бач	аспирант кафедры беспроводных технологий и систем Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, phambachpkkq@sut.ru
ФАМ Конг Куен	аспирант кафедры радиотехники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, fam.kk@sut.ru
ФЕДОРЕНКО Артём Дмитриевич	студент группы ИКТГ-44м Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, fedorenko.ad@sut.ru
ФЕДОТОВ Даниил Дмитриевич	студент группы Р-41м, инженер кафедры цифрового телевидения и метрологии Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, fedotov.dd@sut.ru
ФЕДЮШИН Владимир Борисович	старший преподаватель кафедры физики Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, fizika.ffp@sut.ru
ФЕТЮХИН Илья Александрович	студент группы ИКПИ-24 Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, fetyukhin.ia@sut.ru

- ФЁДОРОВ** кандидат технических наук, доцент, заведующий
Сергей Леонидович кафедрой цифрового телевидения и метрологии
Санкт-Петербургского государственного
университета телекоммуникаций им. проф.
М. А. Бонч-Бруевича, sergey.fedorov@sut.ru
- ФИЛАТОВ** студент группы ИСТ-261 Санкт-Петербургского
Максим Юрьевич государственного университета телекоммуникаций
им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, filatov.myu@sut.ru
- ФИЛИППОВ** кандидат физико-математических наук, старший
Сергей Владимирович научный сотрудник Физико-технического института
им. А. Ф. Иоффе РАН, s.filippov@mail.ioffe.ru
- ФИЛИППОВ** кандидат технических наук, старший научный
Феликс Васильевич сотрудник, доцент кафедры информационных
управляющих систем Санкт-Петербургского
государственного университета телекоммуникаций
им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, filippov.fv@sut.ru
- ФОКИН** доктор технических наук, доцент, заведующий
Григорий Алексеевич кафедрой беспроводных технологий и систем Санкт-
Петербургского государственного университета
телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича,
fokin.ga@sut.ru
- ФРАЗ** аспирант кафедры оптических и квантовых систем
Алексей Вячеславович связи Санкт-Петербургского государственного
университета телекоммуникаций им. проф.
М. А. Бонч-Бруевича, fraz.av@sut.ru
- ХАНИН** доктор физико-математических наук, профессор,
Самуил Давидович профессор кафедры электроники Санкт-
Петербургского государственного университета
телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича,
khanin.sd@sut.ru
- ХАРЬКОВ** студент группы МТП-2511 Санкт-Петербургского
Даниил Александрович государственного университета телекоммуникаций
им. проф. М. А. Бонч-Бруевича,
harkov.da@sut.ru
- ХЛОПУНОВ** младший научный сотрудник научно-
Фёдор Дмитриевич исследовательского центра Военной академии связи
им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного,
xlopunov_fd@mail.ru

- ХОАНГ Вьет Тунг аспирант кафедры систем автоматизации и робототехники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, khoang.vt@sut.ru
- ХОАНГ Куанг Туан аспирант кафедры сетей связи и передачи данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, khoang.kt@sut.ru
- ХОДАКОВСКИЙ Валентин Аветикович доктор технических наук, профессор кафедры электрической связи Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I, hval104@mail.ru
- ХРЕНОВ Андрей Александрович аспирант кафедры радиотехники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, hrenov.aa@sut.ru
- ХУДАЙНАЗАРОВ Юрий Кахрамонович кандидат технических наук, доцент кафедры комплексного обеспечения информационной безопасности Государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова, yu-78@ya.ru
- ХЫА Хю Кыонг аспирант кафедры беспроводных технологий и систем Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, khya.khk@sut.ru
- ЦАП Всеволод Владимирович студент группы Р-42м Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, cap.vv@sut.ru
- ЦЕЛОУСОВ Григорий Андреевич студент группы МПИ-2512 Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, celousov.ga@sut.ru
- ЦЫПНЯТОВ Валерий Борисович кандидат военных наук, доцент, Почетный работник высшего профессионального образования РФ, начальник кафедры автоматизированных систем специального назначения Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного, zvb097@mail.ru

- ЧЕНСКИЙ**
Александр Александрович аспирант кафедры программной инженерии и вычислительной техники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, chenskii.aa@sut.ru
- ЧЕТВЕРУХИН**
Алексей Сергеевич студент группы МАП-2511 Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, chetveruhin.as@sut.ru
- ЧИЖИКОВ**
Савелий Дмитриевич техник по свету отдела по обеспечению киноконцертных залов, студент Санкт-Петербургского государственного института кино и телевидения, saveliychizh@gmail.com
- ЧУДНОВ**
Александр Михайлович доктор технических наук, профессор кафедры робототехники и технологий искусственного интеллекта Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного, chudnow@yandex.ru
- ШАБАНОВ**
Александр Павлович старший преподаватель кафедры систем автоматизации и робототехники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, aps@sut.ru
- ШЕВЧЕНКО**
Александр Александрович кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры защищенных систем связи Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, zss_ibks@sut.ru
- ШИТОВА**
Ольга Сергеевна техник по свету отдела по обеспечению киноконцертных залов, студент Санкт-Петербургского государственного института кино и телевидения, 1fso.rossii@gmail.com
- ШИХАЛИЕВ**
Игорь Игоревич кандидат физико-математических наук, руководитель группы ООО «Т8 НТЦ», shikhaliyev@t8.ru
- ШИЯН**
Андрей Анатольевич кандидат педагогических наук, доцент, доцент кафедры информатики и компьютерного дизайна Санкт-Петербургского, shiyanaa@sut.ru
- ШТЫРЛЯЕВ**
Никита Александрович студент группы ИКВТ-21 Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, shtyrlyayev.na@sut.ru

- ШУМАКОВ кандидат технических наук, доцент,
Павел Петрович заведующий кафедрой электроники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, shumackov_pp@sut.ru
- ЯБЛОЧКИН кандидат технических наук, доцент кафедры линий
Констант ин Александрович связи и измерений в технике связи Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики, k.yablochkin@psuti.ru
- ЯКОВЛЕВ доктор технических наук, профессор кафедры
Виктор Алексеевич защищенных систем связи Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, yakovlev.va@sut.ru
- ЯКОВЛЕВ студент группы М62402 Московского технического
Кирилл Алексеевич университета связи и информатики, k.a.yakovlev@mtuci.ru
- ЯКУШЕВА аспирант кафедры оптических и квантовых систем
Мария Андреевна связи Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, yakusheva.ma@sut.ru
- ЯРЫГИН техник сектора квантовых вычислений НИО
Михаил Александрович «Квантовый центр» Московского технического университета связи и информатики, m.a.yarygin@mtuci.ru

**XV МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ
И НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ**
**«АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ
В НАУКЕ И ОБРАЗОВАНИИ»**
(АПИНО 2026)

Сборник научных статей

Научное издание

Верстка
М. О. Мотыгина
Корректурa
Д. Н. Яшугин
Дизайн логотипа Г. И. Юрьев
Подписано в печать 30.08.2026
Объем 57,75 усл.-печ. л.

Объединенная редакция рецензируемых научных изданий СПбГУТ
193232 СПб., пр. Большевиков, 22, корп. 1



APINO.SUT.RU