

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Поволжский государственный университет сервиса

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ. РАДИОЭЛЕКТРОНИКА. ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ (ITRT-2025)

МАТЕРИАЛЫ XII МЕЖДУНАРОДНОЙ ЗАОЧНОЙ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ
Тольятти, 29 ноября 2025 года

СБОРНИК ТЕЗИСОВ ДОКЛАДОВ

Тольятти
ПВГУС
2026

УДК 004+621.396.6+621.397
ББК 32я431

Члены редакционной коллегии:

*В. И. Воловач (председатель), В. М. Артюшенко, А. А. Бобцов,
О. В. Дворников, В. Г. Карташевский, Ю. Э. Корчагин, Н. Н. Прокопенко.*

Рецензенты:

д-р техн. наук, профессор Тольяттинского
государственного университета *Гориков Б. М.*;

канд. техн. наук, доцент, доцент Высшей школы передовых производственных
технологий Поволжского государственного университета сервиса *Яницкая Т. С.*

Информационные технологии. Радиоэлектроника. Телекоммуникации (ITRT-2025) : материалы XII Международной заочной научно-технической конференции : Тольятти, 29 ноября 2025 года : сборник тезисов докладов / редкол.: В. И. Воловач (пред.) [и др.]. – Тольятти : Издательско-полиграфический центр ПБГУС, 2026. – 1 оптический диск. – ISBN 978-5-9581-0399-7.

В сборнике содержатся тезисы докладов ежегодной международной заочной научно-технической конференции. Представлены результаты исследования ученых, специалистов-практиков, а также студентов профильных направлений в предметных областях радиоэлектроники, телекоммуникаций и информационных технологий.

Сборник предназначен для научных и инженерно-технических работников, специализирующихся в научных направлениях информатики, вычислительной техники и информационных технологий, программной инженерии, радиотехники и электроники, телекоммуникаций и цифровой обработки сигналов.

Текстовое электронное издание.

Рекомендовано к изданию научно-техническим советом Поволжского государственного университета сервиса.

Минимальные системные требования: IBM PC-совместимый компьютер: Windows XP/Vista/7/8/10; ПИИ 500 МГц или эквивалент; 128 Мб ОЗУ; SVGA; CD-ROM; Adobe Acrobat Reader.

ISBN 978-5-9581-0399-7

© Коллектив авторов, 2026

© ФГБОУ ВО «Поволжский государственный
университет сервиса», 2026

Редактор: Т. Н. Нохрина

Художественное оформление,

компьютерное проектирование: И. В. Карасев

Дата подписания к использованию 12.05.2026.

Объем издания 11 Мб.

Тираж 50 экз.

Заказ № 3-26.

Издательско-полиграфический центр
Поволжского государственного университета сервиса
445017, г. Тольятти, ул. Гагарина, 4,
тел. 8 (8482) 22-26-50, www.tolgas.ru

СОДЕРЖАНИЕ

Аббясов Б. Р.

Модель приоритизации задач
сервисных роботов в медицинском учреждении 13

*Аверина Л. И., Гутерман Н. Е.,
Завгородний И. В., Лафицкий А. Ю.*

Цифровой корректор
для линеаризации передающего многоканального
радиотракта с гибридным диаграммообразованием..... 18

Авсиевич В. В., Разуваев А. В.

Анализ нейронных сетей для детекции лиц 30

Алексеева Т. В., Кадырова Г. Р.

Классификация изображений отходов
с использованием сверточной нейронной сети..... 36

Артюшенко В. М., Воловач В. И., Самаров Е. К.

Разработка алгоритма измерения угловых координат
объекта для радиолокационного моноимпульсного измерителя 41

Артюшенко В. М., Воловач В. И., Самаров Е. К.

Метод оценки точностных характеристик
дальномерных измерительных каналов радиотехнических систем..... 46

Артюшенко В. М., Воловач В. И.

Модель измерения дискретного показателя
при неполной информации о распределении вероятности 51

Артюшенко В. М., Воловач В. И.

Разработка робастного F-критерия
для сравнения дисперсий двух выборок 55

Белова О. А.

Звуковая стеганографическая система
с многоуровневым встраиванием информации..... 59

Брачунова У. В., Адаев И. А.

Анализ пространственного неравенства в обеспеченности зелеными зонами на основе семантической сегментации спутниковых снимков 63

Вепрева А. Д., Стефанова И. А.

Повышение эффективности AR-рекламы
за счет реализации компьютерного зрения 71

*Винник М., Кривец К., Ловшенко И. Ю.,
Степанов А. А., Корсак К. В., Новиков П. Э.*

Учет влияния параметров материалов
межэлементных и межуровневых соединений
6Т-ячеек памяти на их эксплуатационные характеристики..... 77

Ворганов А. А., Котенев Е. В., Котенев М. Е.

Основные направления
обеспечения информационной
безопасности функционирования беспилотных
авиационных систем мониторинга в современных условиях..... 82

Вороной А. А., Серегин Н. А.

Радиоэлектронное подавление
каналов управления и передачи данных БПЛА 90

Воронцов А. М., Назарук Е. М., Лутченко С. С.

Моделирование миниатюрных планарных
трансформаторов для преобразователей питания..... 100

Галеев З. З., Дерябин Н. В.

Тенденции развития беспилотной боевой
системы и ее применение в интеллектуальной войне 104

Галеев Р. Н.

Анализ современных подходов
к управлению БПЛА в условиях промышленных помех..... 110

Герасимова А. А., Стефанова И. А.

Разработка адаптивного веб-сайта
с использованием современных frontend-технологий 115

<i>Горбачев Д. И., Паришин А. Ю.</i> Исследование влияния пространственных параметров ММО системы на пропускную способность	121
<i>Гусаров М. Е., Дусенбаев А. Э., Федулов А. М., Львов И. В., Мардгалимов И. Р.</i> Интеллектуальная мультимодульная система предобработки текста для улучшения качества русскоязычного синтеза речи	127
<i>Дусенбаев А. Э., Федулов А. М., Гусаров М. Е., Львов И. В., Мардгалимов И. Р.</i> Архитектура интеллектуального программного комплекса для извлечения и идентификации атрибутов промышленной продукции по данным открыты	132
<i>Дусенбаев А. Э., Федулов А. М., Гусаров М. Е., Львов И. В., Мардгалимов И. Р.</i> Применение нейросетевых моделей NER для извлечения атрибутов промышленной продукции	139
<i>Елисеев С. Н., Курочкин Г. А.</i> Некогерентная демодуляция сигналов ортогональной гибридной MFSK-DPSK модуляции	144
<i>Ермаков М. Д., Токарев А. Б.</i> Обнаружение излучений генератора помех на основе контроля загруженности радиочастотного спектра	150
<i>Запьянцев О. В., Стефанова И. А.</i> Разработка высокопроизводительной веб-системы для анализа специализированных текстовых корпусов	155
<i>Инаходова Л. М., Ярославкина Е. Е., Фролов К. В.</i> Метод кластеризации спектральной плотности мощности акустических сигналов для диагностической оценки состояния ячеек КРУ 6-10 кВ	161
<i>Казанков А. А.</i> Диагностика светодиодов и светодиодных матриц методом фотоэлектрического отклика с локальным фотодовозбуждением	168

<i>Какабьян К. С.</i> Разработка интерактивного инструмента для визуализации и моделирования систем нечеткого логического вывода	174
<i>Кононов А. А., Величкина А. С., Усков Г. К.</i> Компенсация потерь низкочастотных составляющих импульсных сигналов при численном спектральном анализе	179
<i>Кононов А. А., Усков Г. К.</i> Особенности поляризационного множителя для сферической апертурной поверхности.....	184
<i>Корчагин Ю. Э., Назаренко Б. Э.</i> Оптимальность алгоритма различения сигналов в системе LoRa	189
<i>Корчагин Ю. Э., Дорошенко В. Ю., Чеботарев А. А.</i> Результаты вертикального зондирования ионосферного КВ канала	194
<i>Корчагин Ю. Э., Нгуен Ван Тхю</i> Нейросетевые алгоритмы обнаружения радиосигналов с неизвестными частотой, амплитудой и начальной фазой	199
<i>Корчагин Ю. Э., Цыганков А. И.</i> Моделирование решающей статистики алгоритма оценки наклона дисперсионной характеристики ионосферного КВ канала.....	205
<i>Крюков А. Н.</i> Исследование управляемого выпрямителя.....	211
<i>Кузнецов Н. М., Назарук Е. М., Воронцов А. М.</i> Оценка технологий передачи связи 5G с помощью систем спутниковой связи	215
<i>Лаврентьев М. М., Назарук Е. М., Воронцов А. М.</i> Моделирование энергоэффективного алгоритма маршрутизации для беспроводных сенсорных сетей.....	220

Лазаренко В. А., Смирнов С. В.

Алгоритмическая и программная реализация оцифровки
качественных шкал на основе метода уверенных суждений..... 224

Лазаренко В. А., Смирнов С. В.

Формализация
качественных суждений как средство
совершенствования многокритериальных решений..... 228

Левочкин И. М., Назарук Е. М., Воронцов А. М.

Алгоритм компенсации
многолучевых искажений в системах цифровой связи 233

Львов И. В., Гусаров М. Е.,

Мардгалимов И. Р., Федулов А. М., Дусенбаев А. Э.

Сравнительный анализ
классического OCR и визуально-языковых
моделей в задачах распознавания текстовой информации 237

Ляпина К. В.

Исследование методов
передачи структурированных данных
в корпоративных системах электронного документооборота 243

Маврин В. А., Смирнов С. В.

Семантико-логический подход
к распознаванию образов на основе онтологических моделей 248

Малахов С. В., Андреев А. С.

Исследование сетевого протокола DSR..... 253

Малахов С. В., Логинов Д. В.

Исследование эффективности
SaaS технологий в области облачных решений 258

Мардгалимов И. Р., Федулов А. М.,

Гусаров М. Е., Дусенбаев А. Э., Львов И. В.

Двухголовая нейросетевая модель на базе
EfficientNet-B0 для классификации инженерных документов 262

Мясников Д. Л., Нещерет А.М.

Особенности повышения помехоустойчивости

RFID сигналов с использованием сверточной нейронной сети 268

Нефёдова Д. С., Олькова Н. С.

Влияние параметров кодирования видеопотоков на точность детекции

ключевых точек в телекоммуникационных системах реального времени 273

Новиков П. Э., Корсак К. В., Ловшенко И. Ю.

Компьютерное моделирование сегнетоэлектрических

конденсаторов для применений в энергонезависимой памяти 283

Олейников А. В., Усков Г. К., Бобрешов А. М.

Измерение параметров радиоимпульсных

последовательностей на основе акустооптических ячеек..... 288

Осипов О. В., Симакова А. С.

Возможности уменьшения уровня отраженной мощности

от покрытия на основе метаматериала из хи-образных частиц..... 294

Осипов О. В., Спилов Д. С.

Приближенные условия для слоя кирального

метаматериала на основе S-частиц с учетом материальной дисперсии 300

Пахомов И. В., Безбородов Н. А.

Операционный усилитель на основе арсенид-галлиевого технологического

процесса с повышенным коэффициентом усиления по напряжению 306

Прокопенко А. С., Самохина Н. С.

Прогнозирование времени завершения бизнес-процессов с помощью

рекуррентных нейронных сетей и внимания на основе событийных меток 314

Савинов А. А., Солдатов А. Г.

Анализ современных способов вредоносного

воздействия на децентрализованные блокчейн-системы..... 323

Савищенко Н. В., Пелин А. А.

Аналитическое и имитационное моделирование сигналов

стандарта DVB-S2X в канале связи с АБГШ и взаимными помехами..... 328

<i>Самохина Н. С.</i> Аппаратно-программный комплекс на базе микроконтроллера для управления и обработки данных в модернизированном спектрофотометре	338
<i>Самохина Н. С., Ефремов А. С.</i> Алгоритм управления качеством сложной системы обработки данных	344
<i>Сапожников Д. А.</i> Метод маргинальной дискриминации для выявления онтологических инвариантов в многоклассовой классификации изображений	352
<i>Стадников А. С.</i> Внедрение систем безопасности при обслуживании конвейерного оборудования	357
<i>Стрельцова Г. А., Штрафина Е. Д.</i> Вопросы разработки математической модели корпоративной сети спутниковой связи: системный подход	364
<i>Султанов Ж. А., Назарук Е. М., Воронцов А. М.</i> Анализ помехоустойчивости сигналов с ортогональным частотным уплотнением (OFDM) в условиях многолучевого затухания	369
<i>Табаков Д. П., Майоров А. Г.</i> Решение внутренней задачи электродинамики методом аппроксимации собственных функций	374
<i>Табаков Д. П., Николаева К. Б.</i> Решение внутренней и внешней задачи электродинамики для многовитковой тонкопроволочной рамки	381
<i>Толкачев Ф. А., Мячин Д. В., Шульженко С. Н.</i> Модульная архитектура прикладного программного обеспечения: структура, функции и тенденции развития в России в 2025 году	388
<i>Ульянов Д. М., Осанов В. А.</i> Практическое применение компьютерного зрения в задаче бесконтактного управления манипулятором	394

<i>Устинова Е. С.</i> Исследование методов многомасштабного кодирования для гиперспектральных изображений	400
<i>Французова Н. Н., Никифоров Д. И.</i> Разработка системы распределения премиального фонда на основе интеграции веб-портала и системы 1С:зарплата и кадры	404
<i>Чернов В. С.</i> Реконфигурируемые интеллектуальные поверхности как средство улучшения пропускной способности в беспроводных системах	408
<i>Черторийский А. А., Кашистанов Н. В.</i> Моделирование вариантов обработки сигналов многоэлементной линейки фотоприемников в датчике линейных перемещений	413
<i>Шакурский М. В.</i> Устройство фиксации нулевой радиальной скорости объекта.....	419
<i>Шалагин С. В., Данилов Д. А.</i> Метод оценки качества псевдослучайных последовательностей на основе характеристик стохастической матрицы	423
<i>Шалагин С. В., Касимова Д.</i> Применение метода статистических испытаний для решения множественной задачи коммивояжера с одним депо	428
<i>Штеренберг С. И., Зув Д. П.</i> Самоорганизующиеся карты в системах обнаружения вторжений	433
<i>Штеренберг С. И., Потемкина Ю. Ф.</i> Ограничения и модернизация SIEM-систем в условиях внутренних угроз	438
<i>Штеренберг С. И., Шарифов Р. Г.</i> Использование технологий больших данных в SIEM-системах для повышения эффективности мониторинга информационной безопасности	443

Якупов Д. О., Карташевский И. В.

Экспериментальное исследование характеристик
протоколов QUIC, TCP и UDP при передаче файлов и видеопотоков 448

Яницкая Т. С., Гаджук Н. П.

Объединение сегментов
телекоммуникационной сети при конструктивных ограничениях 452

Яницкая Т. С.

Оптимизация размещения распределительных центров
на основе дискретных моделей и лагранжевой релаксации 459

Яницкий А. И., Репников А. Е.

Модель динамики и диагностики промышленного объекта
для информационно-измерительных и управляющих систем..... 464

Яницкая Т. С., Мамедов А. Ф.

Queueing Plex для оценки устойчивости
многосерверной очереди M_t/G/N с переменным спросом 472

Яницкая Т. С., Хохлов Е. А.

Экспериментальная оценка интероперабельности
IoT-устройств в системах умного дома на базе Home Assistant..... 480

МОДЕЛЬ ПРИОРИТЕЗАЦИИ ЗАДАЧ СЕРВИСНЫХ РОБОТОВ В МЕДИЦИНСКОМ УЧРЕЖДЕНИИ

АББЯСОВ Булат Ривалевич, аспирант
Казанский федеральный университет
420008, Россия, Казань, bulat.abbyasov@gmail.com

Аннотация. В работе рассматривается вопрос управления логистическими процессами в медицинском учреждении – формирование приоритета задач для сервисных мобильных роботов. Предложена формальная модель, включающая базовый приоритет, временную составляющую и контекстные факторы клинической среды, такие как временные ограничения, доступность зон и возможные инфраструктурные задержки. Полученная структура позволяет систематизировать влияние различных условий на важность задач и может служить основой для дальнейшего развития методов распределения задач и координации работы сервисных роботов.

Ключевые слова: роботизированная логистика, сервисные роботы, приоритезация задач, клиническая среда.

A TASK PRIORITIZATION MODEL FOR SERVICE ROBOTS IN MEDICAL ENVIRONMENTS

ABBYASOV Bulat, PhD student
Kazan Federal University
420008, Russia, Kazan, bulat.abbyasov@gmail.com

Abstract. This paper addresses a specific aspect of logistics management in medical facilities – the prioritization of tasks assigned to service mobile robots. A formal model is proposed, incorporating a basic task priority, a time-dependent component, and contextual factors such as approaching clinical deadlines, zone accessibility, and expected infrastructural delays. The resulting structure provides a systematic way to account for conditions affecting task importance and may serve as a basis for further development of task allocation and coordination methods for service robots in healthcare logistics.

Keywords: robotic logistics, service robots, task prioritization, clinical environment.

ВВЕДЕНИЕ

Медицинские учреждения характеризуются высокой нагрузкой на персонал и рутинными логистическими операциями: доставкой медикаментов, перемещением биоматериалов, транспортировкой расходных материалов и другие [1, 2]. Эти процессы требуют регулярного исполнения и занимают существенное рабочее время [3]. В связи с этим растет интерес к использованию сервисных робототехнических средств как инструмента для автоматизации наиболее трудоемких и повторяющихся задач [4, 5], что особенно актуально в условиях эпидемических заболеваний [6].

Применение роботизированных систем позволяет повысить устойчивость логистических процессов [7], сократить задержки [8] и снизить нагрузку на персонал [9]. Вместе с тем эффективность такой системы в значительной степени определяется тем, насколько корректно организовано управление задачами [10]. Одним из ключевых элементов этого управления является механизм приоритизации задач, который позволяет учитывать различную важность поступающих задач, их срочность и временные ограничения [11, 12].

Практическое значение исследования заключается в разработке подхода к формированию приоритетов задач, который позволяет структурировать процесс управления роботизированной логистикой и обеспечить более рациональное распределение поступающих задач от оператора. Использование данной модели создает основу для последующих этапов управления – выбор робота, его маршрутизации и диспетчеризации.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В рамках исследования предложена формальная модель приоритизации задач, предназначенная для использования в системах управления сервисными роботами в медицинском учреждении. Модель учитывает три группы факторов:

1. Базовый приоритет задачи: определяется типом задачи и задается экспертно.
2. Динамическое наращивание приоритета в зависимости от времени ожидания задачи: чем дольше задача ожидает выполнения, тем выше ее значимость.
3. Контекстные факторы клинической среды: важные временные рамки, доступность зон, ожидаемые задержки.

Множество задач в количестве n единиц обозначены как $J = \{j_1, j_2, \dots, j_n\}$. Каждой задаче j ставится в соответствие приоритет W_j , рассчитываемый по формуле:

$$W_j = w(type_j) + k * wait_j + C_j,$$

где j – индекс задачи, W_j – итоговый приоритет задачи, $type_j$ – тип задачи (например, «доставка медикаментов»), $w(type_j)$ – базовый приоритет типа задачи, k – коэффициент роста приоритета во времени, $wait_j$ – время ожидания выполнения, C_j – контекстная поправка.

Контекстная поправка может включать:

$$C_j = C_j^{deadline} + C_j^{zone} + C_j^{delay},$$

где $C_j^{deadline}$ – поправка, связанная с приближением крайнего срока выполнения задачи, C_j^{zone} – штраф за недоступность или частичную доступность зон, C_j^{delay} – поправка, связанная с прогнозируемыми инфраструктурными задержками.

Поправка $C_j^{deadline}$ показывает изменения срочности задачи по мере приближения ко времени, когда задача должна быть выполнена. По мере уменьшения оставшегося времени значение поправки растет. Планировщик отслеживает запланированные задачи и обновляет приоритет задач, чтобы избежать нарушения сроков начала исполнения задачи. Поправка C_j^{zone} учитывает текущее состояние доступности зон, по которым по задаче робот должен будет перемещаться. Если доступ временно ограничен (например, происходит уборка коридора), задача получает штраф и временно становится менее подходящей для выполнения. Благодаря этому планировщик не выбирает задачи, которые могут привести

к задержкам или помехам для других участников среды. Поправка C_j^{delay} учитывает ожидаемые задержки, связанные с инфраструктурой. Например, работу санитарных бригад или перемещение пациентов. За счет этого задача, выполнение которой сейчас может привести к задержке, получает корректирующий коэффициент, который уменьшает ее приоритет до более благоприятного момента.

Предложенная формальная модель позволяет последовательно учитывать различные группы факторов, влияющих на важность логистических задач, и тем самым обеспечивает структурированный подход к их ранжированию. Такое описание систематизирует влияние клинических и инфраструктурных условий и может служить основой для последующей разработки методов распределения задач и координации работы сервисных роботов в медицинской среде.

ВЫВОДЫ

В работе рассмотрен частный вопрос формирования приоритета задач в системе управления сервисными роботами медицинского учреждения. Предложена формальная постановка задачи приоритезации и описана модель, учитывающая базовые, временные и контекстные факторы. Использование такой модели позволяет структурировать процесс принятия решений и заложить основу для последующих этапов управления – диспетчеризации и маршрутизации. Представленный подход носит теоретический характер и может служить базой для дальнейших исследований и практических экспериментов по разработке и внедрению комплексных систем роботизированной логистики.

Список источников

1. Aydınocak E. U. Robotics systems and healthcare logistics. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-99-1818-8_7 // Health 4.0 and medical supply chain. Singapore : Springer Nature Singapore, 2023. С. 79-96.
2. A survey of robots in healthcare. DOI:10.3390/technologies9010008 / M. Kyrarini et al. // Technologies. 2021. Т. 9, №. 8. 26 p.
3. Planning and control of autonomous mobile robots for intralogistics: Literature review and research agenda / G. Fracapane et al.

DOI:10.1016/j.ejor.2021.01.019 // European Journal of Operational Research. 2021. Vol. 294, Iss. 2. P. 405-426.

4. Logistical Automation in Hospitals in the DACH Region and Approaches to Increasing Process Efficiency Through Automation / E. C. Spicker et al. // 17th IMHRC Proceedings (Trondheim, Norway-2025). URL: https://digitalcommons.georgiasouthern.edu/pmhr_2025/32. Publication date: 1-12-2025.

5. A Graphical User Interface for Controlling a Group of Service Mobile Robots / R. Gataullin et al. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-032-14674-8_32 // Proceedings of the 6th International Conference on Creativity in Intellectual Technologies and Data Science, Cham, Springer. Publication data: 27.01.2026.

6. Automating pandemic mitigation / E. Magid et al. DOI:10.1080/01691864.2021.1905059 // Advanced Robotics. 2021. T. 35, №. 9. C. 572-589.

7. Service robots in the healthcare sector / J. Holland et al. DOI:10.3390/robotics10010047 // Robotics. 2021. Vol. 10, Iss. 1. 47 p.

8. Autonomous mobile robots in hospital logistics / G. Fragapane et al. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-57993-7_76 // IFIP international conference on advances in production management systems. Cham:Springer International Publishing, 2020. P. 672-679.

9. Cognominal M., Patronymic K., Wańkiewicz A. Evolving field of autonomous mobile robotics: Technological advances and applications. DOI: 10.63995/USAS3015 // Fusion of Multidisciplinary Research, An International Journal. 2021. №. 2. P. 189-200.

10. Task Scheduling with Mobile Robots – A Systematic Literature Review / C. Rema et al. DOI: 10.3390/robotics14060075 // Robotics. 2025. Vol. 14, Iss. 6.

11. Multi-robot preemptive task scheduling with fault recovery: A novel approach to automatic logistics of smart factories / V. C. Kalempa et al. DOI:10.3390/s21196536 // Sensors. 2021. Vol. 21, Iss. 19.

12. Alirezazadeh S., Alexandre L. A. A survey on task allocation and scheduling in robotic network systems DOI:10.48550/arXiv.2303.12876 // IEEE Internet of Things Journal. 2024.

**ЦИФРОВОЙ КОРРЕКТОР ДЛЯ ЛИНЕАРИЗАЦИИ
ПЕРЕДАЮЩЕГО МНОГОКАНАЛЬНОГО РАДИОТРАКТА
С ГИБРИДНЫМ ДИАГРАММООБРАЗОВАНИЕМ**

АВЕРИНА Лариса Ивановна, доктор физико-математических наук, профессор кафедры электроники физического факультета
Воронежский государственный университет
394018, Россия, Воронеж, averina@phys.vsu.ru

ГУТЕРМАН Никита Евгеньевич, аспирант
Воронежский государственный университет
394018, Россия, Воронеж, guterman@phys.vsu.ru

ЗАВГОРОДНИЙ Илья Вячеславович, аспирант
Воронежский государственный университет
394018, Россия, Воронеж, zavgorodny@phys.vsu.ru

ЛАФИЦКИЙ Александр Юрьевич, младший научный сотрудник
Воронежский государственный университет
394018, Россия, Воронеж, lafitsky@phys.vsu.ru

Аннотация. Предложен подход для линеаризации передающего многоканального радиотракта в системах с гибридным диаграммообразованием. Предложены структуры цифровых корректоров во временной области, позволяющие дополнительно снизить уровень пространственных интермодуляционных лучей, образованных из-за нелинейности усилителей мощности в многоканальной системе. Представлены результаты численного моделирования разработанных структур и моделей цифровых корректоров для кольцевой 16-элементной антенной решетки и двух пользователей, подтверждающие эффективность предложенных подходов.

Ключевые слова: многоканальная система, цифровые предсказания, антенная решетка.

**DIGITAL CORRECTOR FOR LINEARIZATION OF A TRANSMITTING
MILTICHANNEL RADIO PATH WITH HYBRID BEAMFORMING**

AVERINA Larisa Ivanovna, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor at the Department of Electronics of the Faculty of Physics

*Voronezh State University
394018, Russia, Voronezh, averina@phys.vsu.ru*

GUTERMAN Nikita Evgenievich, PhD student
*Voronezh State University
394018, Russia, Voronezh, guterman@phys.vsu.ru*

ZAVGORODNY Ilya Vyacheslavovich, PhD student
*Voronezh State University
394018, Russia, Voronezh, zavgorodny@phys.vsu.ru*

LAFITSKY Alexander Yurievich, junior researcher
*Voronezh State University
394018, Russia, Voronezh, lafitsky@phys.vsu.ru*

Abstract. An approach for linearizing a multichannel radio transmission path in systems with hybrid beamforming is proposed. Digital time-domain corrector structures are proposed that further reduce the level of spatial intermodulation beams caused by the nonlinearity of power amplifiers in a multi-channel system. Results of numerical simulations of the developed digital corrector structures and models for a 16-element annular antenna array and two users are presented, confirming the effectiveness of the proposed approaches.

Keywords: multi-channel system, digital pre-distortion, antenna array.

ВВЕДЕНИЕ

Использование антенных решеток (АР) с адаптивным диаграммообразованием в системах СВЧ радиосвязи позволяет обеспечивать выполнение требований к высокой пропускной способности, достоверности, дальности связи. Основным устройством аналогового тракта, вносящим нелинейные искажения в передаваемый сигнал, является усилитель мощности (УМ). Причем в системах на основе антенных решеток усилитель мощности будет расположен в каждом передающем канале.

Наиболее эффективным методом борьбы с нелинейными искажениями сигнала в передающем тракте является метод цифровых предускажений, который широко используется для различных одноканальных систем [1, 2]. Данный метод помогает достигать высокой линейности передаваемого сигнала,

уменьшая одновременно его внутрисполосные искажения и уровень внеполосных излучений. Линеаризацию многоканального тракта с цифровым диаграммообразованием позволяют реализовать алгоритмы цифровых предискажений, разработанные для одноканальных систем. При этом использование отдельного цифрового корректора для каждого усилителя мощности повышает требования к вычислительным ресурсам, но не встречает принципиальных проблем. В системах с гибридным диаграммообразованием (рис. 1) число усилителей больше, чем число цифровых каналов, и диаграмма направленности (ДН) формируется аналоговым способом. Таким образом, реализация отдельных цифровых корректоров для каждого УМ в такой системе невозможна.

Как известно, многоканальная система позволяет реализовать технологию пространственного разделения абонентов. В гибридных системах возникающие из-за нелинейности УМ интермодуляционные искажения, связанные с абонентами, не могут быть скомпенсированы на уровне цифровых потоков [3]. В работах [4–6] предлагаются методы линеаризации, основанные на оценке нелинейных искажений в направлениях предполагаемого нахождения абонентов. Для этого используется схема, формирующая эквивалент принимаемого абонентом сигнала. Такой подход позволяет уменьшить внеполосное излучение в направлении пользователя, но не позволяет уменьшить уровень интермодуляционных лучей. Нелинейные искажения сигналов как в направлении основных, так и интермодуляционных лучей можно уменьшить, если уменьшить нелинейные искажения на выходе каждого усилителя мощности [7–10].

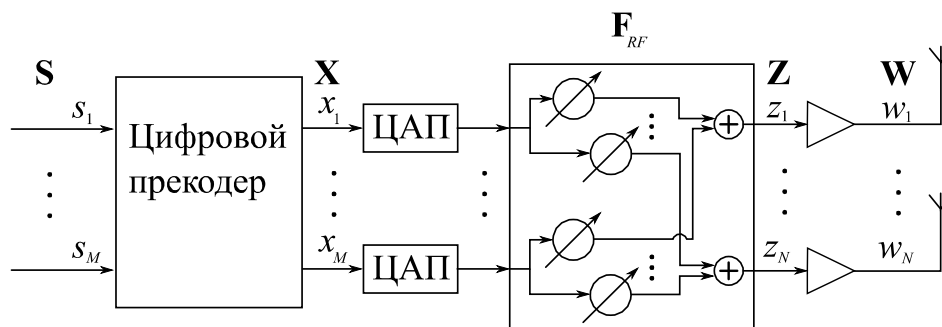


Рис. 1. Система с гибридным диаграммообразованием

Целью данной работы является синтез алгоритма цифрового предсказания сигналов, позволяющего линеаризовать многоканальную систему с гибридным диаграммообразованием.

АЛГОРИТМ ЦИФРОВЫХ ПРЕДСКАЖЕНИЙ

Рассмотрим модель нелинейной многоканальной системы с обратным контролем (рис. 2). В ней нелинейная характеристика корректора и усилителя представлена в виде суммы входного сигнала нелинейного устройства и некоторой добавки, являющейся нелинейной функцией входного сигнала. Для осуществления линеаризации необходимо, чтобы добавка корректора ΔX компенсировала нелинейность усилителей ΔZ . С учетом матрицы диаграммообразования F_{RF} это условие примет вид

$$F_{RF}\Delta X + \Delta Z = 0. \quad (1)$$

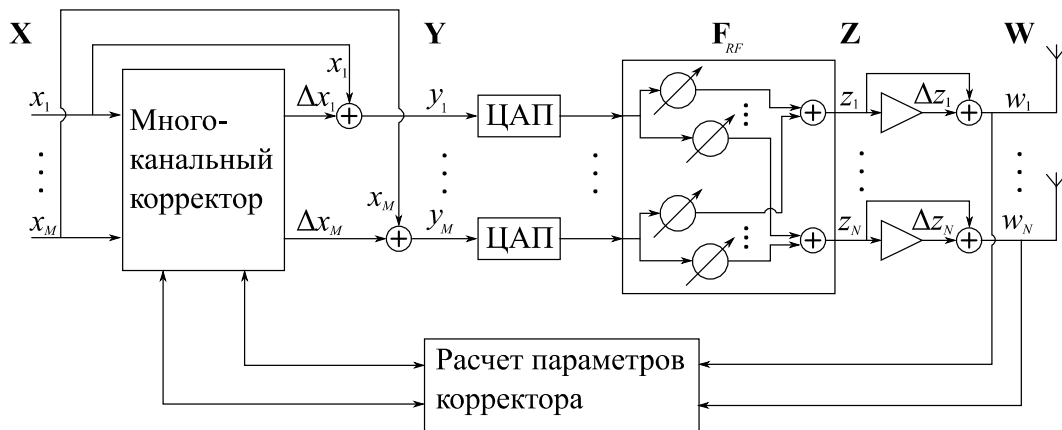


Рис. 2. Нелинейная многоканальная система с инжекцией

Из (1) следует, что полная компенсация возможна только в случае, когда ΔZ представимо в виде линейной комбинации столбцов матрицы F_{RF} , что в общем случае не имеет места.

Самыми значимыми нелинейными составляющими УМ являются составляющие третьего порядка. Для случая двух потоков эти составляющие будут представлять суммой двух членов

$$f_{i3} \sim \alpha_1 f_1 \cdot f_1 \cdot f_2^* + \alpha_2 f_2 \cdot f_2 \cdot f_1^*, \quad (2)$$

где $\mathbf{f}_1, \mathbf{f}_2$ первый и второй векторы-столбцы матрицы $\mathbf{F}_{RF}$, знак « $\bullet$ » – поэлементное умножение векторов (произведение Адамара), « $*$ » – комплексное сопряжение, α_1, α_2 – некоторые числа, зависящие от амплитуд потоков. Для компенсации описанных искажений предлагается расширить матрицу $\mathbf{F}_{RF}$ двумя столбцами – первым и вторым слагаемым (2). Получим выражение для расчета корректора.

Рассмотрим модель корректора, линейную относительно своих коэффициентов, и имеющую вид

$$x_{DPD} = \sum_{i=1}^L K_i^* g_i(x) = \mathbf{K}^H \hat{\mathbf{x}}, \quad (3)$$

где K_i – искомые коэффициенты корректора, L – число коэффициентов, g_i – некоторая функция входного сигнала, называемая также базисной функцией корректора. Сигнал на входе УМ имеет вид:

$$\mathbf{Z} = \mathbf{F}_{RF}(\mathbf{X} + \Delta\mathbf{X}) = \mathbf{F}_{RF}\mathbf{X} + \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^M f_{1,i}\Delta x_i \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^M f_{N,i}\Delta x_i \end{bmatrix}.$$

Предположим, что характеристики УМ идентичны. Тогда в каждом канале должны быть идентичные корректоры. Запишем выражение для $\Delta\mathbf{X}$ с учетом (3):

$$\mathbf{F}_{RF}\Delta\mathbf{X} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^L K_i^* \hat{x}_{i,1} \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^L K_i^* \hat{x}_{i,N} \end{bmatrix}, \quad \hat{x}_{k,j} = g_k\left(\sum_{i=1}^M f_{j,i}\Delta x_i\right).$$

Так как корректор работает на уровне потоков в цифровом виде, необходимо преобразовать выражение для $\Delta\mathbf{X}$

$$\Delta\mathbf{X} = \mathbf{F}_{RF}^+ \mathbf{F}_{RF} \Delta\mathbf{X} = \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^N f_{1,j}^+ \sum_{i=1}^L K_i^* \hat{x}_{i,j} \\ \vdots \\ \sum_{j=1}^N f_{M,j}^+ \sum_{i=1}^L K_i^* \hat{x}_{i,N} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^L K_i^* \sum_{j=1}^N f_{1,j}^+ \hat{x}_{i,j} \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^L K_i^* \sum_{j=1}^N f_{M,j}^+ \hat{x}_{i,N} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_i K_i^* U_{i,1} \\ \vdots \\ \sum_i K_i^* U_{i,M} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{K}^H \mathbf{U}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{K}^H \mathbf{U}_M \end{bmatrix},$$

где знаком « $+$ » обозначена псевдообратная матрица.

Для нахождения вектора корректора $\mathbf{K}$ минимизируем квадрат суммы нелинейных добавок корректора и усилителя

$$\langle (\mathbf{F}_{RF}\Delta\mathbf{X} + \Delta\mathbf{Z})^2 \rangle \rightarrow 0,$$

где угловые скобки означают усреднение. В реальной системе связи непосредственное измерение величины ΔZ требовало бы модель УМ. Заменим ΔZ разностью входа и нормированного выхода УМ

$$\Delta Z = F_{RF} Y - W / K_G, \quad (4)$$

где W – выход УМ, Y – вход схемы аналогового диаграммообразования, K_G – коэффициент усиления линеаризованного УМ. Используя предположение об идентичности УМ, перепишем выражение для целевой функции

$$J = \langle (\mathbf{K}^H \hat{\mathbf{x}} + \Delta z)^2 \rangle, \quad (5)$$

где Δz – элемент вектора (4). Возьмем градиент (5) по $\mathbf{K}^H$

$$\frac{\partial J}{\partial \mathbf{K}^H} = \langle \hat{\mathbf{x}} \hat{\mathbf{x}}^H \rangle \mathbf{K} + \langle \hat{\mathbf{x}} \Delta z^* \rangle + \mathbf{K}^H \langle \hat{\mathbf{x}} \frac{\partial}{\partial \mathbf{K}^H} \Delta z^* \rangle + \langle \Delta z \frac{\partial}{\partial \mathbf{K}^H} \Delta z^* \rangle.$$

Два последних слагаемых равны нулю, поэтому получим

$$\frac{\partial J}{\partial \mathbf{K}^H} = \langle \hat{\mathbf{x}} \hat{\mathbf{x}}^H \rangle \mathbf{K} + \langle \hat{\mathbf{x}} \Delta z^* \rangle = \mathbf{R} \mathbf{K} + \mathbf{p} = 0.$$

Решение будем находить итеративно по следующему алгоритму:

$$\begin{aligned} & \mathbf{R} = \langle \hat{\mathbf{x}} \hat{\mathbf{x}}^H \rangle, \Delta \mathbf{X} = \mathbf{0} \\ & \text{for } i = 1, \text{ to } i = N, \text{ do} \\ & \quad \mathbf{Y} = \mathbf{X} + \Delta \mathbf{X} \\ & \quad \mathbf{Z} = \mathbf{F}_{RF} \mathbf{Y} \\ & \quad \Delta z_i = [\mathbf{W}]_i - [\mathbf{Z}]_i \\ & \quad \mathbf{p} = \langle \hat{\mathbf{x}} \Delta z_i^* \rangle \\ & \quad \mathbf{K} = -\mathbf{R}^{-1} \mathbf{p} \\ & \quad \Delta \mathbf{X} = [\mathbf{K}^H \mathbf{U}_1, \dots, \mathbf{K}^H \mathbf{U}_M]^T \\ & \text{end,} \end{aligned} \quad (6)$$

где N – число итераций.

РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для оценки качества работы предложенного алгоритма было проведено компьютерное моделирование. Моделировалась 16 элементная узкополосная кольцевая антенная решетка с гибридным диаграммообразованием. Система работала с двумя потоками, фазирующий вектор первого абонента направлен на 90 градусов, второго – на 130 градусов.

Модель усилителя мощности представляла собой полиномиальную функцию с памятью. При этом считалось, что все усилители мощности обладают одинаковыми линейными и нелинейными свойствами. Оценка внеполосного излучения проводилась с использованием OFDM сигнала, полоса анализа составляла 2,5 полос сигнала.

Модель корректора задавалась полиномом с памятью

$$y(n) = \sum_{m=0}^{M_a} \sum_{k=1}^{K_a} a_{km} x(n-m) |x(n-m)|^{2(k-1)},$$

где y – выход корректора, x – вход корректора, a_{km} – параметры корректора, n – временной индекс, m – индекс задержки, M_a – глубина памяти, K_a – степень нелинейности. В работе использовалось $M_a = 2$, $K_a = 3$. Усреднение в алгоритме (6) проводилось на 46080 отсчетах сигнала, число итераций равнялось 8. Для количественной оценки качества коррекции использовался параметр АСРР равный отношению мощностей главного и побочного частотных каналов.

Сначала анализировался цифровой корректор без дополнительных каналов (рис. 2). На рис. 3 изображены спектры четырех полученных сигналов: кривая 1 соответствует исходному сигналу, 2 – сигналу в дальней зоне для первого абонента без корректора, 3 – сигналу на выходе усилителя мощности без корректора, 4 – сигналу в дальней зоне с корректором, 5 – сигналу на выходе усилителя мощности с корректором. Следует отметить, что подобная картина будет и для сигнала второго абонента, а также сигналов на выходе всех усилителей мощности. Видно, что данный корректор успешно линеаризует систему в направлении абонентов, но не линеаризует каждый радиочастотный канал, что приводит к появлению интермодуляционных лучей, являющихся помехами для других абонентов.

На рис. 4 представлены рассчитанные нормированные диаграммы направленности излучающей системы: кривая 1 – без наличия усилителей мощности, 2 – при наличии усилителей мощности без цифровой коррекции, 3 – при наличии усилителей мощности цифровой коррекцией, 4 – потери излучаемой мощности из-за нелинейности усилителей мощности.

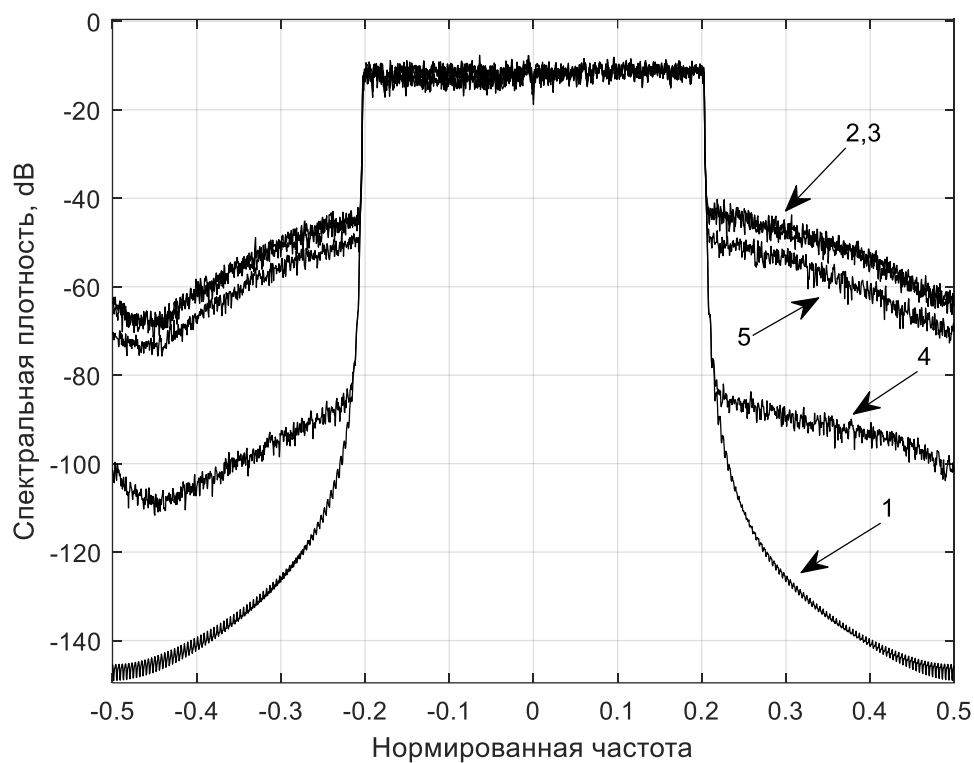


Рис. 3. Спектры сигналов в системе без дополнительных каналов

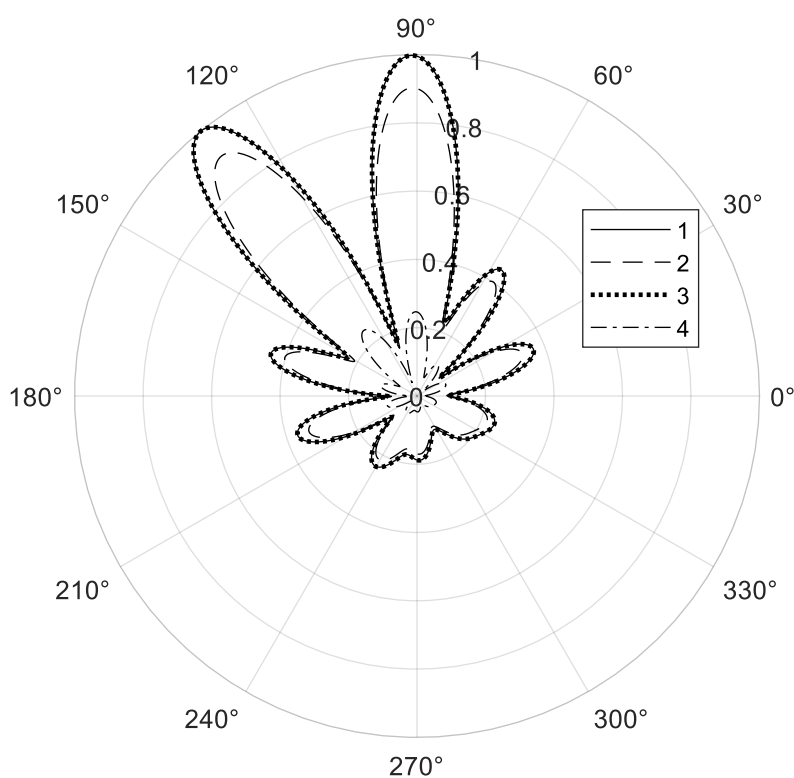


Рис. 4. Нормированные диаграммы направленности излучающей системы

Далее оценивалась эффективность корректора с двумя дополнительными каналами, имеющими фазированные вектора вида:

$$\mathbf{f}_3 = \mathbf{f}_1 \cdot \mathbf{f}_1 \cdot \mathbf{f}_2^*, \quad \mathbf{f}_4 = \mathbf{f}_2 \cdot \mathbf{f}_2 \cdot \mathbf{f}_1^*.$$

Блок-схема предложенной системы изображена на рис. 5. На рис. 6 изображены спектры тех же пяти сигналов, что и в предыдущем случае.

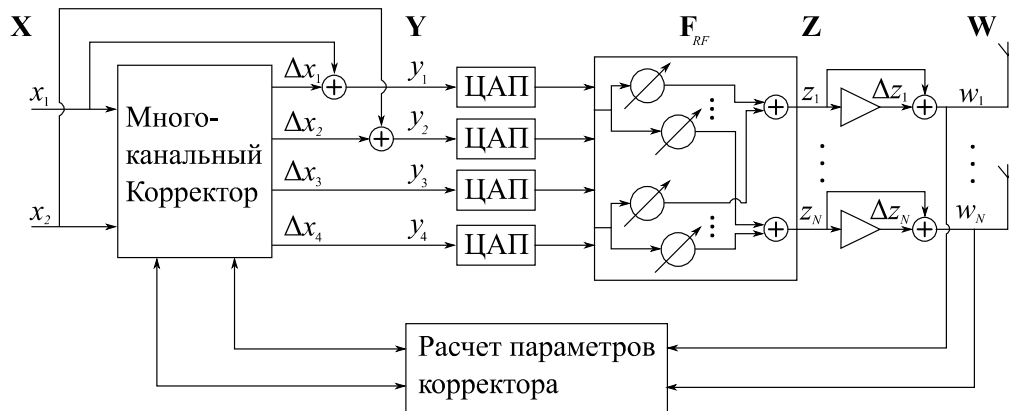


Рис. 5. Модель системы с дополнительными каналами

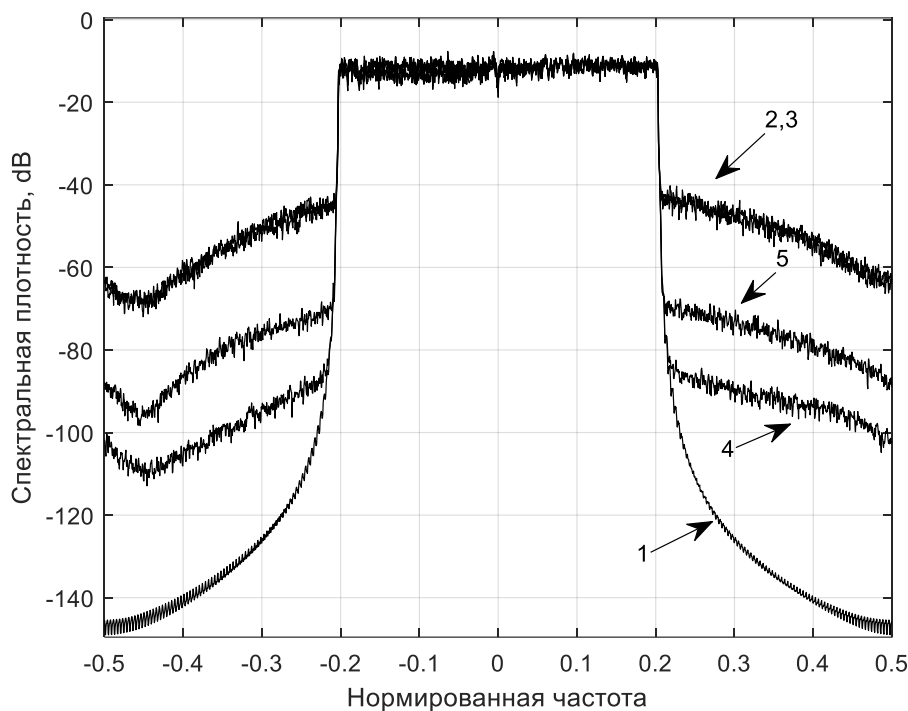


Рис. 6. Спектры сигналов в системе с дополнительными каналами

Из рисунка видно, что в данном случае удастся линеаризовать всю систему не только в направлении пользователей, но и значительно снизить уровень энергетических потерь в других направлениях. Для наглядности на рис. 7 изображены зависимости потери мощности в излучающей системе из-за нелинейности усилителей мощности: кривая 1 соответствует системе без цифрового

корректора, 2 – с цифровым корректором без дополнительных каналов, 3 – с цифровым корректором с дополнительными каналами.

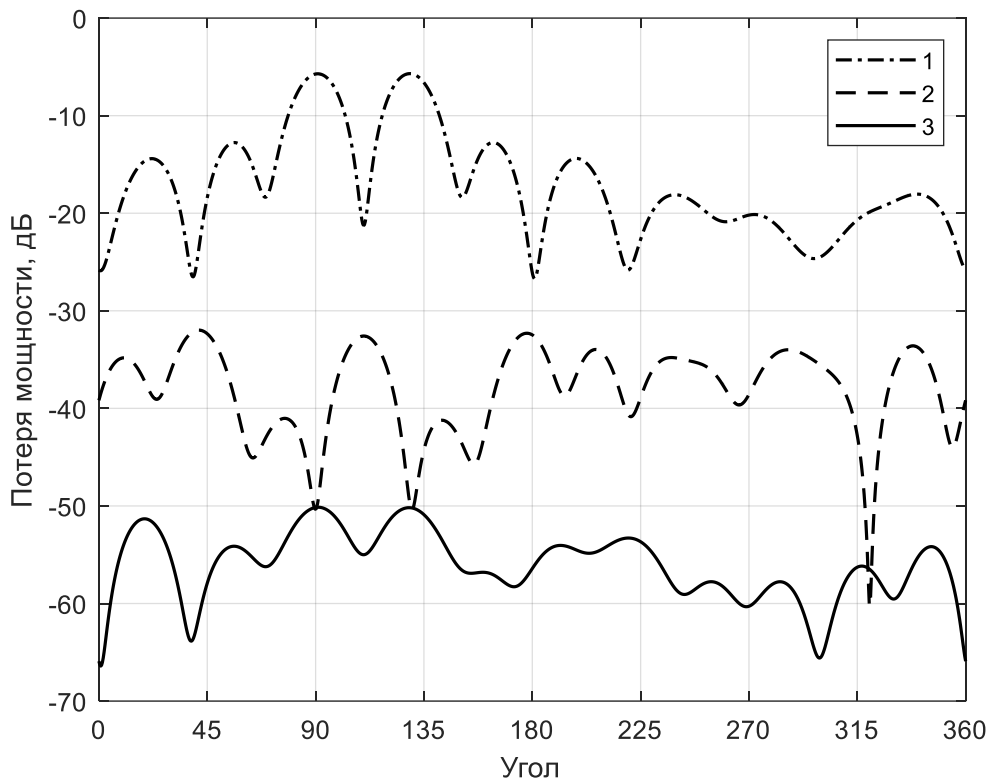


Рис. 7. Потери мощности в излучающей системе

В табл. 1 сведены значения АСРР, полученные в результате моделирования.

Таблица1

Значения АСРР, полученные в результате компьютерного моделирования

	Система без дополнительных каналов		Система с дополнительными каналами	
	АСРРL, дБ	АСРРR, дБ	АСРРL, дБ	АСРРR, дБ
Входной сигнал	-84,96	-82,67	-84,96	-82,67
Выход УМ без корректора	-40,77	-36,87	-40,77	-36,87
Выход УМ с корректором	-46,87	-44,77	-67,35	-64,02
Сигнал в дальней зоне	-81,85	-77,85	-82,11	-78,10

ВЫВОДЫ

Предложенный метод цифровых предискажений для линеаризации передающего многоканального радиотракта в системах с гибридным диаграммообразованием позволяет значительно уменьшить вычислительную сложность реализации без потери ее эффективности. Предложенные структуры цифровых корректоров во временной области позволяют дополнительно снизить уровень пространственных интермодуляционных лучей, образованных из-за нелинейности усилителей мощности в многоканальной системе. Показано, как должны изменяться размерность и структура матрицы аналогового диаграммообразования для подавления интермодуляционных лучей. Представленные результаты численного моделирования разработанных структур и моделей цифровых корректоров для кольцевой 16 элементной антенной решетки с гибридным диаграммообразованием и двумя пользователями подтверждают эффективность предложенных подходов.

Список источников

1. Аверина Л. И., Бобрешов А. М., Шутов В. Д. Повышение линейности передающего тракта методом цифровых предискажений // Нелинейный мир. 2013. № 10. С. 720–727.
2. Аверина Л. И., Лавлинский С. С. Двухблочная модель цифрового корректора для линеаризации аналогового радиотракта // Радиотехника и электроника. 2017. Т. 62, № 7. С. 687–692.
3. Проблемы линеаризации многоканального передающего тракта с гибридным диаграммообразованием / Аверина Л. И. [и др.] // Теория и техника радиосвязи. 2024. № 2. С. 28–35.
4. Liu X., Chen W., Chu J. Behavioral Modeling and Digital Predistortion for Fully-Connected Hybrid Beamforming Massive MIMO Transmitters. DOI:10.1109/APMC47863.2020.9331620 // 2020 IEEE Asia-Pacific Microwave Conference (APMC). Hong Kong : IEEE, 2020. P. 463–465.
5. Multi-Stream Spatial Digital Predistortion for Fully-Connected Hybrid Beamforming Massive MIMO Transmitters / Liu X. et al. DOI: 10.1109/TCSI.2021.

3072591 // IEEE Transactions on Circuits and Systems I Regular Papers. 2021. Vol. 68, № 7. P. 2998–3011.

6. A General Digital Predistortion Linearization Scheme for Hybrid Beamforming System / L. Zhao et al. DOI: 10.1109/TVT.2022.3203690 // IEEE Trans. Veh. Technol. 2023. Vol. 72, № 1. P. 654–663.

7. Digital Predistortion for Hybrid MIMO Transmitters / M. Abdelaziz et al. DOI: 10.1109/JSTSP.2018.2824981 // IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing. 2018. Vol. 12, № 3. P. 445–454.

8. Linearization for Hybrid Beamforming Array Utilizing Embedded Over-the-Air Diversity Feedbacks / Liu X. et al. DOI: 10.1109/TMTT.2019.2944821 // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2019. Vol. 67, № 12. P. 5235–5248.

9. Yan J., Wang H., Shen J. Novel Post-Weighting Digital Predistortion Structures for Hybrid Beamforming Systems. DOI: 10.1109/LCOMM.2021.3120648 // IEEE Communication Letters. 2021. Vol. 25, № 12. P. 3980–3984.

10. Power Scalable Beam-Oriented Digital Predistortion for Compact Hybrid Massive MIMO Transmitters / X. Liu et al. DOI: 10.1109/TCSI.2020.3008804 // IEEE Transactions on Circuits and Systems I Regular Papers 2020. Vol. 67, № 12. P. 4994–5006.

АНАЛИЗ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ДЕТЕКЦИИ ЛИЦ

АВСИЕВИЧ Владимир Викторович, кандидат технических наук,
доцент кафедры инженерии искусственного интеллекта
*Поволжский государственный университет
телекоммуникаций и информатики
443000, Россия, Самара, Avsievichv@yandex.ru*

РАЗУВАЕВ Александр Вячеславович, магистрант
кафедры инженерии искусственного интеллекта
*Поволжский государственный университет
телекоммуникаций и информатики
443000, Россия, Самара, razuvaev.sasha2015@yandex.ru*

Аннотация. В статье проводится анализ современных детекторов лиц – YOLO, RetinaFace, Dlib, MTCNN и InsightFace, рассматривая их архитектуры, принципы работы, преимущества и ограничения с учетом скорости инференса, точности и устойчивости к различным условиям съемки.

Ключевые слова: детекция лиц, нейронные сети, YOLO, RetinaFace, MTCNN, Dlib, InsightFace, компьютерное зрение, производительность, точность.

ANALYSIS OF NEURAL NETWORKS FOR IMPLEMENTING FACE DETECTION

Avsievich Vladimir Viktorovich, Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor at the Department of Artificial Intelligence Engineering
*Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics
443000, Russia, Samara, Avsievichv@yandex.ru*

Razuvaev Alexander Vyacheslavovich, Master's student
at the Department of Artificial Intelligence Engineering
*Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics
443000, Russia, Samara, razuvaev.sasha2015@yandex.ru*

Abstract. The article analyzes modern face detectors – YOLO, RetinaFace, Dlib, MTCNN and InsightFace, considering their architectures, principles of operation, advantages and limitations, taking into account the speed of inference, accuracy and resistance to various shooting conditions.

Keywords: face detection, neural networks, YOLO, RetinaFace, MTCNN, Dlib, InsightFace, computer vision, performance, accuracy.

ВВЕДЕНИЕ

Детекция лиц – ключевая задача компьютерного зрения, применяемая в видеонаблюдении, биометрии и человеко-компьютерном взаимодействии. В работе проведен обзор детекторов YOLO, RetinaFace, Dlib, MTCNN и InsightFace с акцентом на их архитектуры и области применения [1–4]. Качество моделей оценивалось на трех кейсах: множество мелких лиц, окклюзии (маска и очки) и поворот головы, используя изображения LFW и собственные данные.

НЕЙРОСЕТИ

YOLO (You Only Look Once) объединяет генерацию регионов и классификацию в единую модель, разделяя изображение на сетку для предсказания объектов, что обеспечивает высокую скорость детекции (рис. 1) и делает ее основой современных систем видеонаблюдения и распознавания лиц [1].

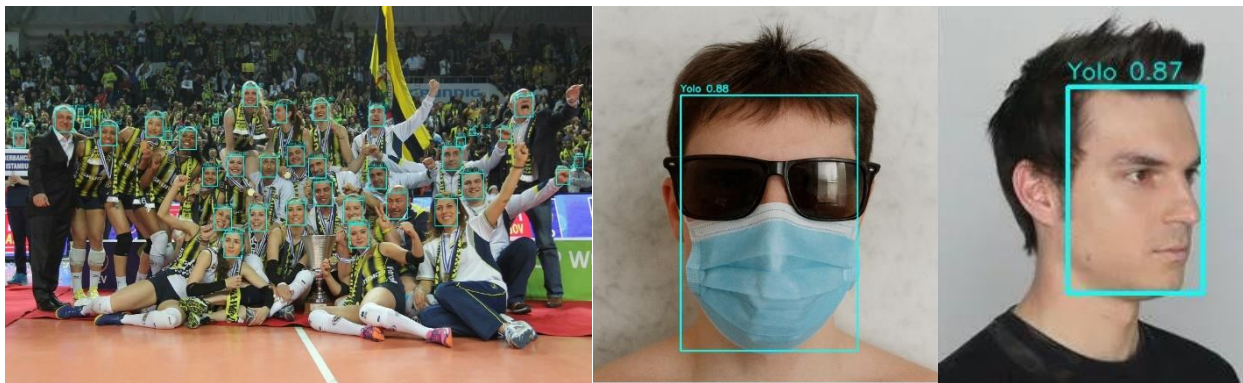


Рис. 1. Результаты детекции модели YOLO

RetinaFace – одностадийный детектор на базе RetinaNet (рис. 2), адаптированный под распознавание лиц и обеспечивающий оптимальный баланс между универсальными моделями вроде YOLO и специализированными решениями типа MTCNN [2].

Библиотека Dlib – открытое решение для детекции лиц (рис. 3), реализованное на C++ и Python. В ее составе представлены два подхода: классический метод на основе HOG с SVM и современный CNN-детектор [3].



Рис. 2. Результаты детекции модели Retina



Рис. 3. Результаты детекции модели Dlib

MTCNN – каскадная мультизадачная сеть, которая одновременно выполняет детекцию и выравнивание лиц (рис. 4), обеспечивая устойчивость к изменениям освещения, мимики и небольшим поворотам головы [3].

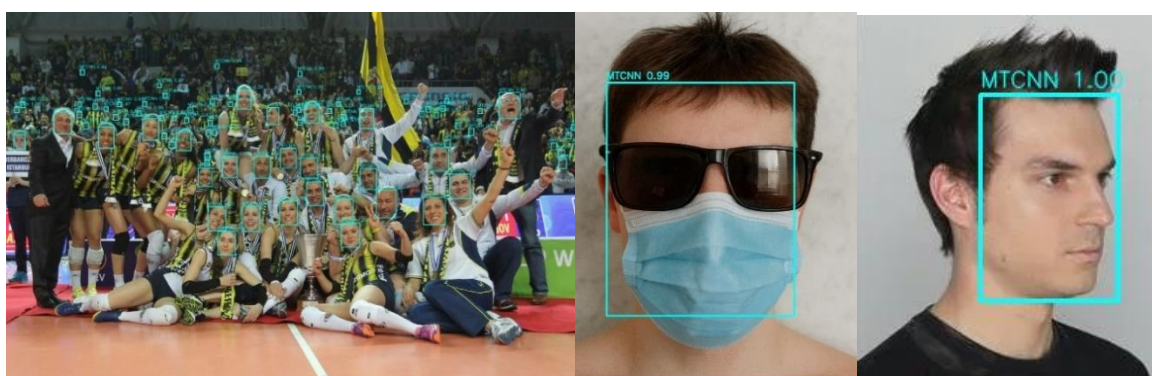


Рис. 4. Результаты детекции модели MTCNN

InsightFace – это экосистема для анализа лиц (рис. 5), объединяющая детектор SCRFD с высокой скоростью и точностью и модель распознавания ArcFace, использующую угловую функцию потерь для повышения различимости эмбедингов [4].



Рис. 5. Результаты детекции модели InsightFace

СРАВНЕНИЕ

Результаты сравнительного анализа отображают основные преимущества, недостатки и сферу применения каждой рассматриваемой модели (табл. 1).

Таблица 1

Сравнение нейросетей в контексте решения задачи детекции

Модель	Преимущества	Недостатки	Сфера применения
YOLO	- очень высокая скорость инференса (до 100 FPS); - универсальность и поддержка множества классов; - гибкая архитектура и активное сообщество.	- сложности с детекцией мелких и частично закрытых лиц; - требует тщательной настройки якорей и гиперпараметров; - ниже точность на сложных сценах по сравнению с RetinaFace.	подходит для систем видеонаблюдения, мониторинга толп, мобильных приложений и реального времени.
RetinaFace	- высокая точность при сложных условиях (освещение, поза); - одновременная детекция, landmarks и 3D-поза; - Эффективная работа с лицами разных размеров благодаря FPN.	- большие требования к GPU и времени обучения; - медленнее YOLO; - сложнее портировать на мобильные устройства.	оптимален для офлайн-обработки изображений, аналитики качества, биометрических систем.

Dlib	• простота использования и интеграции в Python-проекты; • минимальные зависимости, стабильная работа; • встроенное определение 68 ключевых точек.	• чувствительность к поворотам головы и окклюзиям, низкая скорость на видео; • устаревшая архитектура по сравнению с современными CNN; • детектор не справился с задачей окклюзии, поэтому для задач с частично закрытыми лицами он не подходит (рис. 3)	• хорош для академических исследований, прототипирования, небольших локальных систем.
MTCNN	• точная локализация и встроенные landmarks; • хорошая устойчивость к мимике и освещению; • эффективное каскадное уточнение результатов.	• медленная работа на больших изображениях; • последовательная структура усложняет оптимизацию; • не подходит для обработки видео в реальном времени.	• применяется в предварительной обработке лиц, исследовательских пайплайнах, фотоанализе.
InsightFace	• высокая точность и поддержка 2D/3D landmarks; • модульность и совмещение детекции, выравнивания и распознавания; • предобученные модели и поддержка промышленного применения.	• требует мощных GPU; • сложная интеграция в легкие приложения; • не оптимален для офлайн или мобильных систем.	• используется в промышленных биометрических решениях, банкинге, системах безопасности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Детекция лиц остается одним из ключевых направлений развития искусственного интеллекта. Каждая архитектура имеет свои особенности: YOLO выделяется высокой скоростью, RetinaFace обеспечивает хороший баланс между точностью и производительностью, MTCNN отличается стабильностью, Dlib

не справляется с задачей окклюзии (рис. 3), а InsightFace демонстрирует комплексный подход и максимальную точность [5]. Выбор детектора должен определяться спецификой задачи [4] – будь то приоритет быстродействия, точности или устойчивости к сложным условиям съемки. Несмотря на существенный прогресс, универсального решения, сочетающего максимальную скорость, точность и простоту интеграции, пока не существует.

Список источников

1. YOLOX: Exceeding YOLO Series in 2021 / Z. Ge et al. // arXiv preprint [сайт]. URL: <https://arxiv.org/abs/2107.08430> (date of request: 12.11.2025).
2. Deng J., Guo J., Zafeiriou S. RetinaFace: Single-Shot Multi-Level Face Localisation in the Wild/ DOI: 10.1109/CVPR42600.2020.00525 // IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2020. P. 5203–5212.
3. Wang M. Deep Face Recognition: A Survey/ DOI:10.1016/j.neucom.2020.10.081 // Neurocomputing. 2018. Vol. 429. P. 1–12.
4. Разуваев А. В., Осанов В. А. Анализ методов детекции для распознавания личности на изображении. DOI: 10.14489/vkit.2025.10.pp.010-021 // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2025. № 10. С. 10-21.
5. MagFace: A Universal Representation for Face Recognition and Quality Assessment / Q. Meng et al. DOI: 10.1109/CVPR46437.2021.01400 // IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2021. P. 14225–14234.

КЛАССИФИКАЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ ОТХОДОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СВЕРТОЧНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

АЛЕКСЕЕВА Татьяна Витальевна, студент
Ульяновский государственный технический университет
445123, Россия, Ульяновск, tatianalekseewa@yandex.ru

КАДЫРОВА Гульнара Ривальевна, кандидат технических наук,
доцент кафедры «Прикладная математика и информатика»
Ульяновский государственный технический университет
445123, Россия, Ульяновск, pmi.kadyrova@mail.ru

Аннотация. В статье представлен метод автоматической классификации изображений бытовых отходов с использованием современной архитектуры сверточных нейронных сетей DenseNet121. Работа направлена на развитие автоматизированных систем сортировки и управления отходами на базе современных методов компьютерного зрения и машинного обучения.

Ключевые слова: обработка изображений, классификация отходов, сверточные нейронные сети, глубокое обучение, transfer learning, Keras, аугментация данных, машинное обучение.

CLASSIFICATION OF WASTE IMAGES USING CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORK

ALEKSEEVA Tatiana Vitalyevna, student
Ulyanovsk State Technical University
445123, Russia, Ulyanovsk, tatianalekseewa@yandex.ru

KADYROVA Gulnara Rivalyevna, Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor at the Department of «Applied Mathematics and Informatics»
Ulyanovsk State Technical University
445123, Russia, Ulyanovsk, pmi.kadyrova@mail.ru

Abstract. This article presents a method for automatic classification of household waste images using the modern architecture of convolutional neural networks DenseNet121. The work focuses on the development of automated waste sorting

and management systems based on contemporary computer vision and machine learning methods.

Keywords: image processing, waste classification, convolutional neural networks, deep learning, transfer learning, Keras, data augmentation, machine learning.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время одной из актуальных проблем современного общества стало эффективное управление отходами и переработка мусора. Кроме того, этот вопрос имеет большое значение и с точки зрения экологической безопасности. Традиционные методы классификации отходов по типам имеют ограниченную эффективность и требуют строгого ручного контроля. Однако в свете развития методов компьютерного зрения и глубокого обучения появляются возможности высокоточного анализа изображений.

Современные методы обработки изображений на основе глубокого обучения демонстрируют высокую эффективность в этой области. В данной работе используется сверточная нейросеть DenseNet121. В исследовании «Plastic Waste Classification using DenseNet and CNN» [1] показано, что DenseNet121 благодаря плотным связям между слоями обеспечивает более высокую точность и эффективность классификации пластикового мусора, превосходя традиционные архитектуры, за счет улучшенного распространения признаков и борьбы с затухающими градиентами. Применение transfer learning также уменьшает требование к объему размеченных данных и ускоряет обучение.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В качестве исходного набора использован датасет с изображениями отходов, разбитый на две категории – «О» (органические отходы) и «R» (отходы для вторичной переработки). Для улучшения точности предсказаний необходимо повысить способность модели к обобщению данных. Для этого была применена аугментация изображений с использованием класса ImageDataGenerator из библиотеки Keras, включающая случайные повороты изображений, сдвиги, искажения, масштабирование и горизонтальное отражение. Эти операции

расширяют разнообразие обучающей выборки, что снижает вероятность переобучения сети.

В качестве основы модели мы использовали архитектуру DenseNet121, предобученную на широко известном датасете с изображениями ImageNet. Для сохранения уже изученных низкоуровневых признаков изображений первые 100 слоев сети были заморожены, а остальные остались доступными для обучения. Также были добавлены дополнительные слои:

- слой глобального среднего пуллинга (Global Average Pooling) для уменьшения размерности карты признаков;
- полносвязный слой с 256 нейронами и функцией активации ReLU;
- слой деактивации нейронов (Dropout) с вероятностью 0,2 для борьбы с переобучением;
- выходной слой с функцией активации softmax.

Обучение модели производилось с использованием оптимизатора Adam с шагом обучения 0,001. В качестве функции потерь мы использовали категориальную кросс-энтропию. Модель обучалась в течение 15 эпох с контролем качества на валидационной выборке.

После обучения была произведена оценка модели на тестовой выборке. Общая точность классификации составила 92 %, что является хорошим результатом на данном этапе разработки.

Кроме того, для более детального анализа качества классификации была построена матрица ошибок (confusion matrix), изображенная на рис. 1, которая позволяет наглядно оценить распределение правильно и неправильно классифицированных изображений по классам. Это помогает выявить, какие классы модель распознает хуже и на каких ошибках стоит сфокусироваться в дальнейшем при доработке архитектуры модели.

ВЫВОДЫ

Таким образом, применение архитектуры DenseNet121 позволяет эффективно решать задачу классификации изображений отходов. Подход

обеспечивает достаточно высокую точность на тестовых данных и может быть использован в системах автоматизированной сортировки мусора.

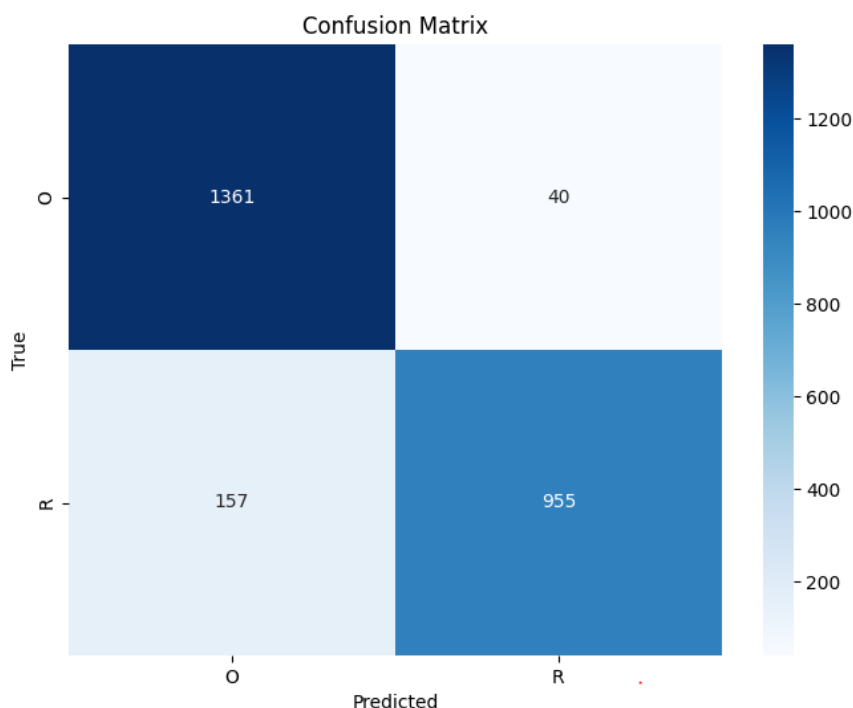


Рис. 1. Матрица ошибок

В дальнейшем планируется повышать точность и эффективность модели при помощи донастройки слоев сети, усложнения аугментации данных, подбора оптимальных параметров и прочих экспериментов с архитектурой сети.

Список источников

1. Lavanya K. B., Annapurna V. K. Plastic Waste Classification using DenseNet and CNN // GRENZE International Journal of Engineering and Technology. 2025. Vol. 11, iss. 1. P. 1510-1515. URL: <https://thegrenze.com/index.php?display=page&view=journalabstract&absid=3784&id=8> (date of request: 12.11.2025).
2. TensorFlow Core Guide // TensorFlow : [сайт]. URL: <https://www.tensorflow.org/guide> (date of request: 12.11.2025).
3. Sashaank Sekar. Waste Classification data // Kaggle : [сайт]. URL: <https://www.kaggle.com/datasets/techsash/waste-classification-data/data> (date of request: 12.11.2025).
4. Безбородов Н. А. Обзор легковесных моделей сверточных нейронных сетей // Перспективы развития технических наук в условиях цифровой

трансформации современного образования : сборник научных статей. Москва : ООО «СИГМА», 2025. С. 12-15. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=82692770> (дата обращения: 12.11.2025). Режим доступа: для авториз. пользователей.

5. Ватьян А. С., Гусарова Н. Ф., Добренко Н. В. Системы искусственного интеллекта. Санкт-Петербург : Университет ИТМО, 2022. 186 с. ISBN 978-5-7577-0669-6.

6. Золкин А. Л. Методы идентификации и отслеживания объектов в системах дополненной реальности и компьютерного зрения : учебное пособие для вузов. Санкт-Петербург : Лань, 2025. 172 с. ISBN 978-5-507-53151-6.

7. Костин С. В., Шамраев А. А., Якимайнен Д. С. Автоматическая классификация и сортировка бытовых отходов // Современные наукоемкие технологии. 2022. № 5-2. С. 204–208.

8. Чернышев С. Д. Суперразрешение для зашумленных изображений с использованием сверточных нейронных сетей // Современные проблемы проектирования, производства и эксплуатации радиотехнических систем : сборник научных трудов. Ульяновск : УлГТУ, 2024. С. 78–81.

**РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ИЗМЕРЕНИЯ УГЛОВЫХ
КООРДИНАТ ОБЪЕКТА ДЛЯ РАДИОЛОКАЦИОННОГО
МОНОИМПУЛЬСНОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ**

АРТЮШЕНКО Владимир Михайлович, доктор технических наук,
заведующий кафедрой информационных технологий и управляющих систем
*Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза,
летчика-космонавта А. А. Леонова – филиал ФГБОУ ВО «МИИГАиК»
141070, Россия, Королев, artyschenko@mail.ru*

ВОЛОВАЧ Владимир Иванович, доктор технических наук,
директор высшей школы передовых производственных технологий
*Поволжский государственный университет сервиса
445017, Россия, Тольятти, volovach.vi@mail.ru*

САМАРОВ Евгений Кимович, доктор технических наук,
заведующий кафедрой математики
*Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
190121, Россия, Санкт-Петербург, omega511@mail.ru*

Аннотация. Осуществлена разработка алгоритма измерения угловой координаты объекта для обзорной моноимпульсной радиолокационной станции с когерентной межпериодной обработкой, инвариантной к параметрам частотной модуляции. Предложено использование замены неизвестных значений сдвига фаз сигнала, обусловленного детерминированной частотной модуляцией эхо-сигналов, состоятельными оценками этих сдвигов фаз.

Ключевые слова: моноимпульсный измеритель, когерентная обработка сигнала, алгоритм измерения угловых координат, пеленгационная характеристика, пачка эхо-сигналов.

**DEVELOPMENT OF AN ALGORITHM FOR MEASURING ANGULAR
COORDINATES OF AN OBJECT FOR RADAR MONOPULSE METER**

ARTYUSHENKO Vladimir Mikhaylovich, Doctor of Engineering Sciences,
head at the Department of information technology and control systems
*Technological University named after twice Hero of the Soviet Union,
pilot-cosmonaut A. A. Leonov – branch of FSBEI HE MIIGAiK
141070, Russia, Korolev, artyschenko@mail.ru*

VOLOVACH Vladimir Ivanovich, Doctor of Engineering Sciences,
director at the higher school of advanced manufacturing technologies
Volga Region State University of Service
445017, Russia, Togliatty, volovach.vi@mail.ru

SAMAROV Evgeniy Kimovich, Doctor of Engineering Sciences,
head at the Department of mathematics
St. Petersburg State Maritime Technical University
190121, Russia, St. Petersburg, omega511@mail.ru

Abstract. An algorithm for measuring the angular coordinate of an object for a survey monopulse radar station with coherent inter-period processing, invariant to frequency modulation parameters, has been developed. It is proposed to use replacement of unknown values of phase shift of the signal due to deterministic frequency modulation of echo signals with consistent estimates of these phase shifts.

Keywords: monopulse meter, coherent signal processing, angular coordinate measurement algorithm, direction finding characteristic, echo burst.

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что для измерения угловых координат моноимпульсным методом используется пеленгационная характеристика [1]. Для формирования последней может применяться обзорная амплитудная моноимпульсная система с суммарно-разностной обработкой эхо-сигналов. Для решения задачи совместного обнаружения-измерения координат объекта в обзорных моноимпульсных РЛС используют пачку эхо-сигналов [2, 3]. Получение высокой точности измерения угловой координаты достигается накоплением энергии пачки эхо-сигналов. Некогерентное накопление энергии, использующееся в обзорных моноимпульсных системах, обладает рядом недостатков. Например, невозможно устранить смещение оценки угловой координаты.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В статье предложено решение, основанное на использовании когерентного накопления энергии и синтезе соответствующего эффективного измерителя угловых координат.

Показано, что в процессе обработки эхо-сигналов возможно использование как когерентного, так и некогерентного накоплений энергии пачки названных сигналов. Отмечается, что эффективность того или иного из названных накоплений энергии зависит от отношения сигнал/шум (ОСШ). При ОСШ менее 0,5 эффективно некогерентное накопление, а при ОСШ близком к 1 эффективность некогерентного накопления практически равна нулю. При малых ОСШ и больших расстояниях до обнаруживаемого объекта эффективным является когерентное накопление энергии.

Предложено использование замены неизвестных значений сдвига фаз сигнала, обусловленного детерминированной частотной модуляцией (ЧМ) эхо-сигналов, состоятельными оценками этих сдвигов фаз φ_d [4]. Такое решение позволяет избежать применения громоздких многоканальных систем.

Получен оптимальный по критерию максимального правдоподобия алгоритм оценивания амплитуды пачки эхо-сигналов:

$$\exp\{i\varphi_d\} = \frac{\dot{X}}{|\dot{X}|} = \cos\varphi_d + i\sin\varphi_d = \frac{\operatorname{Re}\dot{X}}{|\dot{X}|} + \frac{\operatorname{Im}\dot{X}}{|\dot{X}|}, \quad (1)$$

от которого становится возможным получить следующее выражение для определения максимума функционала правдоподобия:

$$u = \frac{\operatorname{Re}\dot{X}^2 + \operatorname{Im}\dot{X}^2}{|\dot{X}|} = |\dot{X}| = \left| \sum_{j=2}^L \dot{U}_{j-1}^* \dot{U}_j \right|. \quad (2)$$

Полученный алгоритм оценки величины $\exp\{i\varphi_d\}$ обладает инвариантностью к детерминированному сдвигу фаз при детерминированной ЧМ, что является значительным преимуществом в сравнении с алгоритмом обычного когерентного накопления энергии.

Отдельно отметим, что в выражении (2) величина $\dot{X}$ эквивалентна комплексной огибающей накопленной пачки импульсов. Можно записать следующее выражение для случая, когда амплитуды огибающих в соседних отсчетах примерно одинаковы:

$$\dot{X} \approx \sum_{j=2}^L |U_j|^2 \exp\{i(\varphi_d + \psi_j - \psi_{j-1})\}.$$

На основе оценки фазы сигнала был получен алгоритм оценки углового рассогласования:

$$\hat{\delta\varepsilon} = \frac{|\dot{X}_\Delta|}{|\dot{X}_\Sigma|} \text{sign} \left(\text{Re} \frac{\arg \dot{X}_\Delta}{\arg \dot{X}_\Sigma} \right) \text{ или } \hat{\delta\varepsilon} = \text{Re} \frac{\dot{X}_\Delta \dot{X}_\Sigma^*}{\dot{X}_\Sigma \dot{X}_\Sigma^*},$$

который после ряда преобразований можно записать в следующем виде:

$$\hat{\delta\varepsilon} = \text{Re} \frac{|\dot{X}_\Delta| |\dot{X}_\Sigma| \exp\{i(\varphi_\Delta - \varphi_\Sigma)\}}{|\dot{X}_\Sigma|^2} = \frac{A_\Delta A_\Sigma}{A_\Sigma^2} \cos(\varphi_\Delta - \varphi_\Sigma) = \frac{A_\Delta}{A_\Sigma} \cos(\varphi_\Delta - \varphi_\Sigma). \quad (3)$$

Используя алгоритм (3) и результат (2), получим математическую модель обзорного моноимпульсного измерителя угловой координаты объекта (рис. 1).

Показано, что синтезированный измеритель обладает независимостью погрешности измерения угловой координаты объекта от фазовой модуляции эхосигналов.

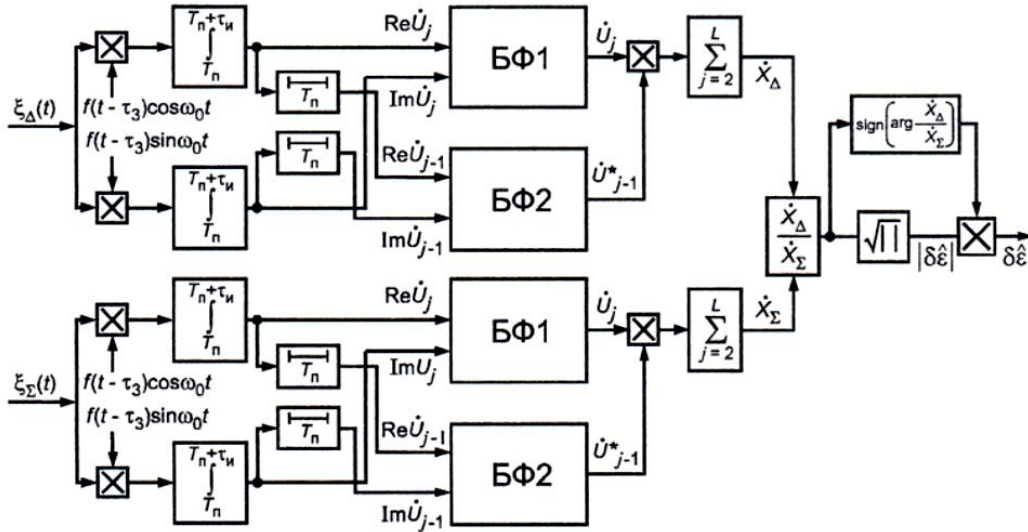


Рис. 1. Математическая модель обзорного моноимпульсного измерителя угловой координаты объекта

ВЫВОДЫ

Предложенные решения позволяют повысить эффективность работы измерителя при детерминированной априори неизвестной фазовой модуляции эхосигналов. Разработанный алгоритм обладает высоким быстродействием,

при котором к моменту приема последнего импульса пачки эхо-сигналов будет закончен процесс измерения. Алгоритм легко реализуется при цифровой обработке первичной радиолокационной информации.

Список источников

1. Леонов А. И., Фомичев К. И. Моноимпульсная радиолокация. Москва : Радио и связь, 1984. 392 с.
2. Родс Д. Р. Введение в моноимпульсную радиолокацию. Москва : Сов. радио, 1960. 160 с.
3. Ширман Я. Д., Манжос В. Н. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. Москва : Радио и связь, 1981. 416 с.
4. Артюшенко В. М., Воловач В. И. Оценка ошибки определения параметров движения маневрирующих объектов // Радиотехника. 2024. Т. 88, № 9. С. 123-131.

**МЕТОД ОЦЕНКИ ТОЧНОСТНЫХ
ХАРАКТЕРИСТИК ДАЛЬНОМЕРНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ
КАНАЛОВ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

АРТЮШЕНКО Владимир Михайлович, доктор технических наук,
заведующий кафедрой информационных технологий и управляющих систем
*Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза,
летчика-космонавта А. А. Леонова – филиал ФГБОУ ВО «МИИГАиК»
141070, Россия, Королев, artjuschenko@mail.ru*

ВОЛОВАЧ Владимир Иванович, доктор технических наук,
директор высшей школы передовых производственных технологий
*Поволжский государственный университет сервиса
445017, Россия, Тольятти, volovach.vi@mail.ru*

САМАРОВ Евгений Кимович, доктор технических наук,
заведующий кафедрой математики
*Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
190121, Россия, Санкт-Петербург, omega511@mail.ru*

Аннотация. Разработан метод оценки точностных характеристик радиотехнической системы, основанный на практическом применении статистически сглаженных результатов дальномерных измерений квантово-оптической системы, редуцированных к одним координатам и одному моменту времени с измерениями радиотехнической системы. Приведена и обоснована методика оценки погрешности измерений дальности запросных измерительных каналов радиотехнических систем, использующая предложенный метод, в частности, результаты измерений квантово-оптической системы.

Ключевые слова: измерительный канал, квантово-оптическая система, измерение дальности, полиномиальное сглаживание, дисперсия сглаженных измерений.

**METHOD FOR EVALUATION OF THE ACCURACY
CHARACTERISTICS OF THE RANGE-FINDING MEASURING
CHANNELS OF RADIO ENGINEERING SYSTEMS**

ARTYUSHENKO Vladimir Mikhaylovich, Doctor of Engineering Sciences,
head at the Department of information technology and control systems

*Technological University named after twice Hero of the Soviet Union,
pilot-cosmonaut A. A. Leonov – branch of FSBEI HE MIIGAiK
141070, Russia, Korolev, artyuschenko@mail.ru*

VOLOVACH Vladimir Ivanovich, Doctor of Engineering Sciences,
director at the higher school of advanced manufacturing technologies
*Volga Region State University of Service
445017, Russia, Togliatty, volovach.vi@mail.ru*

SAMAROV Evgeniy Kimovich, Doctor of Engineering Sciences,
head at the Department of mathematics
*St. Petersburg State Maritime Technical University
190121, Russia, St. Petersburg, omega511@mail.ru*

Abstract. A method has been developed for assessing the accuracy characteristics of a radio system based on the practical application of statistically smoothed results of rangefinder measurements of a quantum optical system, reduced to one coordinates and one moment in time with measurements of the radio system. A method for estimating the error of measuring the range of interrogation measuring channels of radio engineering systems using the proposed method, in particular, the results of measurements of the quantum optical system, has been presented and substantiated.

Keywords: measuring channel, quantum optical system, range measurement, polynomial smoothing, variance of smoothed measurements.

ВВЕДЕНИЕ

В различных навигационных системах, используемых, в частности, для навигации космических аппаратов, требуется производить регулярную оценку различных точностных характеристик дальномерных измерительных каналов радиотехнических систем [1–3]. Последние применяются для прецизионного определения эфемерид и временных поправок. В качестве одного из доступных методов оценки этих точностных характеристик предлагается использовать статистически сглаженные результаты дальномерных измерений квантово-оптической системы (КОС). Вполне очевидно, что при этом координаты и моменты измерения времени должны быть взаимно связаны для обеих систем.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для определения измеряемой величины дальности на заданном интервале сглаживания используется выражение:

$$R(t_i) = \alpha_0 + \alpha_1 t_i + \alpha_2 \frac{t_i^2}{2!} + \dots + \alpha_m \frac{t_i^m}{m!} + \varepsilon_i.$$

Была получена корреляционная матрица ошибок оценки параметров, описывающая влияние случайных погрешностей измерения на точность:

$$K_\alpha = \sigma^2 (A^T A)^{-1} = \begin{bmatrix} \sigma_0^2 k_{01} k_{0m} \\ k_{10} \sigma_1^2 k_{1m} \\ \dots\dots\dots \\ k_{m0} k_{m1} \sigma_m^2 \end{bmatrix}.$$

Как правило, в описываемых измерениях принято определять дисперсии сглаживания данных для разных сглаживающих функций, например:

$$D(r_n^*) = \sigma^2 \sum_{j=1}^m \frac{\varphi_j^2(t_n)}{\sum_{i=1}^N \varphi_j^2(t_n)}, \quad n = \overline{1, N}.$$

Также были определены локальные минимумы и максимумы дисперсии сглаживания. Получены зависимости дисперсии сглаживания от положения точки внутри интервала сглаживания для полиномов различной степени. В частности, показано, что для полинома второй степени оптимальная привязка точки сглаживания позволяет получить выигрыш в точности 20...25 %.

На основе аналитических расчетов показано, при каких условиях характерные точки дисперсии сглаживания могут совпадать для различных сглаживающих функций.

Определены значения оптимальных точек проведения измерений, предложена методика и расчетная формула для определения точек оптимальной привязки, в том числе сглаженных значений. Так, для полиномов четных степеней точки оптимальной привязки вычисляются так:

$$t_{\min} = \left(\frac{1}{2} \pm \frac{a_1}{2} \right) L,$$

а для полиномов нечетных степеней

$$t_{\min} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i.$$

Значительное внимание было уделено определению подходов к выбору степени сглаживающего полинома [4], а также особенности их применения. Ключевым при таком выборе является вычисление статистики W_n^2 и проверка выполнения следующего неравенства:

$$W_n^2 < \sigma^2 \chi_p^2 (N - n - 1),$$

вплоть до его выполнения для определенного сглаживающего полинома.

Определен квадрат ошибки сглаживания для полинома степени n внутри заданного интервала для некоторой точки

$$\Delta_{ni}^2 = D(r_{ni}^*) + S m_{ni}(r_{ni}^*) = \sigma^2 \sum_{j=0}^n \frac{\varphi_j^2(t_i)}{\sum_{m=1}^N \varphi_j^2(t_m)} + \left[\sum_{j=n+1}^k \beta_j \varphi_j(t_i) \right]^2$$

либо в самом общем случае можно записать:

$$\beta_k^2 < \frac{\sigma}{T^k} \frac{2^k (2k-1)!!}{k!} \sqrt{\frac{2k+1}{N(N^2-1)(N^2-k^2)}}.$$

Приведено использование статистики оценки коэффициента автокорреляции при единичном сдвиге для отклонений измеренных величин от их сглаженных полиномов для неизвестной дисперсии ошибок измерений:

$$R_n = \frac{\sum_{i=1}^{N-1} [r(t_i) - r_n^*(t_i)] [r(t_{i+1}) - r_n^*(t_{i+1})]}{\sum_{i=1}^{N-1} [r(t_i) - r_n^*(t_i)]}.$$

Также получена зависимость среднего квадрата ошибки сглаживания для точки оптимальной привязки от количества измерений. Описана предлагаемая методика оценки погрешности измерений дальности запросных измерительных каналов радиотехнических систем с использованием измерений КОС.

ВЫВОДЫ

Предложенный метод и основанная на нем методика позволяют повысить точность оценки погрешности измерений дальности за счет оптимальной привязки сглаженного значения результатов измерений по сравнению с привязкой

в середине интервала. Рассчитанные значения точек локальных максимумов для полиномов различных степеней могут использоваться в практических расчетах описываемых систем.

Список источников

1. Сетевые спутниковые радионавигационные системы / под ред. П. П. Дмитриева, В. С. Шебшаевича. Москва : Радио и связь. 1993. 408 с.
2. Мусонов В. М., Романов А. П. Уменьшение погрешностей местоопределений объектов радионавигационной системы // Сибирский аэрокосмический журнал. 2023. Т. 23, №. 1. С. 21–32.
3. Артюшенко В. М., Воловач В. И. Оценка погрешности измерения скорости движения в условиях изменяющейся дальности до лоцируемого объекта // Радиотехника. 2016. Т. 80, № 6. С. 118-123.
4. Вентцель Е. С., Овчаров Л. А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения. Москва : Наука, 2000. 480 с.

**МОДЕЛЬ ИЗМЕРЕНИЯ ДИСКРЕТНОГО
ПОКАЗАТЕЛЯ ПРИ НЕПОЛНОЙ
ИНФОРМАЦИИ О РАСПРЕДЕЛЕНИИ ВЕРОЯТНОСТИ**

АРТЮШЕНКО Владимир Михайлович, доктор технических наук,
заведующий кафедрой информационных технологий и управляющих систем
*Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза,
летчика-космонавта А. А. Леонова – филиал ФГБОУ ВО «МИИГАиК»
141070, Россия, Королев, artyschenko@mail.ru*

ВОЛОВАЧ Владимир Иванович, доктор технических наук,
директор высшей школы передовых производственных технологий
*Поволжский государственный университет сервиса
445017, Россия, Тольятти, volovach.vi@mail.ru*

Аннотация. Получена модель измерения дискретного показателя случай-
ной величины для определения апостериорных оценок математического ожида-
ния и дисперсии названного показателя. Предложенная модель объединяет
как статистическую информацию, так и нечисловую, неточную и неполную
априорную информацию.

Ключевые слова: дискретный показатель, нечисловая, неточная и непол-
ная априорная информация, математическое ожидание, дисперсия, статисти-
ческая информация.

**DISCRETE MEASURE MODEL WITH INCOMPLETE
PROBABILITY DISTRIBUTION INFORMATION**

ARTYUSHENKO Vladimir Mikhaylovich, Doctor of Engineering Sciences,
head at the Department of information technology and control systems
*Technological University named after twice Hero of the Soviet Union,
pilot-cosmonaut A. A. Leonov – branch of FSBEI HE MIIGAiK
141070, Russia, Korolev, artyschenko@mail.ru*

VOLOVACH Vladimir Ivanovich, Doctor of Engineering Sciences,
director at the higher school of advanced manufacturing technologies
*Volga Region State University of Service
445017, Russia, Togliatty, volovach.vi@mail.ru*

Abstract. Obtained is model of measurement of discrete index of random value for determination of posterior estimates of mathematical expectation and variance of said index. The proposed model combines both statistical information and non-numerical, inaccurate and incomplete a priori information.

Keywords: discrete measure, non-numeric, imprecise and incomplete a priori information, expectation, variance, statistical information.

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что стохастические модели часто используются при измерении дискретных показателей x с конечным множеством значений [1]. Для получения же оценки неизвестного показателя обычно используется математическое ожидание, а в отдельных случаях наиболее близкий к математическому ожиданию элемент конечного множества дискретных показателей X . Также для оценки неопределенности оценки математического ожидания может использоваться либо дисперсия случайной величины, либо стандартное отклонение.

Вместе с тем стохастическая модель не может быть эффективно использована при ограниченной некоторыми возможными значениями, неполной и неточной информации [2]. Вследствие чего интерес представляет получение моделей, допускающих работу с неполной информацией.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В статье предложено решение, основанное на использовании известного подхода рандомизации неопределенности [3], позволяющего получить рандомизированное математическое ожидание

$$\mu(I) = x_1 w_1(I) + \dots + x_n w_n(I),$$

которое и позволит моделировать неопределенность оценки измеряемого показателя x .

Также для оценки неопределенности дисперсии σ^2 можно использовать

$$\overline{\sigma}^2(I) = M \sigma^2(I) = \sum_{i=1}^n M \left[\left(x_i - \mu(I) \right)^2 \overline{w}_i(I) \right],$$

где $\bar{w}_i(I) = M w_i(I)$, $i = 1, \dots, n$.

Заметим, что, как правило, информация I носит нечисловой характер.

Опуская ряд рассуждений и преобразований, характеризующих переход от нечислового, неточного и неполного характера информации к определению математического ожидания и дисперсии, запишем интересующие выражения:

$$\mu(I) = M \mu(I) = \frac{1}{N(n, k; I)} \sum_{t=1}^{N(n, k; I)} \bar{\mu}^{(t)}; \quad (1)$$

$$\bar{\sigma}^2(I) = D \sigma^2(I) = \frac{1}{N(n, k; I)} \sum_{t=1}^{N(n, k; I)} \bar{\sigma}_t^2, \quad (2)$$

где $\bar{\mu}^{(t)} = x_1 w_1^{(t)} + \dots + x_n w_n^{(t)}$;

$$\bar{\sigma}_t^2 = \left(x_1 - \bar{\mu}^{(t)} \right)^2 w_1^{(t)} + \dots + \left(x_n - \bar{\mu}^{(t)} \right)^2 w_n^{(t)}, \quad t = 1, \dots, N(n, k; I).$$

Выражения (1) и (2) представляют собой числовой образ нечисловой, неточной и неполной априорной информации I и являются фактически априорными оценками параметров неизвестной ПРВ.

Для учета статистической информации используется известный байесовский подход [4]. В этом случае можно записать следующие выражения (3) и (4) для определения эмпирической оценки математического ожидания и дисперсии:

$$\bar{\mu}(I^*) = \sum_{i=1}^n x_i \bar{w}_i(I^*); \quad (3)$$

$$\bar{\sigma}^2(I) = \sum_{i=1}^n \left[x_i - \bar{\mu}(I^*) \right]^2 \bar{w}_i(I^*). \quad (4)$$

Используя далее определенную нами апостериорную ПРВ $f(t; I, I^*)$, запишем выражения (5) и (6) в виде:

$$\bar{\mu}(I, I^*) = M \mu(I, I^*) = \sum_{t=1}^{N(n, k; I)} \bar{\mu}^{(t)} f(t; I, I^*);$$

$$\bar{\sigma}^2(I, I^*) = M \sigma^2(I, I^*) = \sum_{t=1}^{N(n, k; I)} \bar{\sigma}_t^2(I, I^*) f(t; I, I^*).$$

ВЫВОДЫ

Предложенные решения позволяют повысить эффективность методов оценки неопределенности. Полученные выражения для определения эмпирической оценки математического ожидания и дисперсии могут быть спешно применены в практических расчетах, в том числе для систем мониторинга и управления сложными техническими объектами в реальных производственных условиях.

Список источников

1. Pinsky M., Karlin S. An introduction to stochastic modeling. Academic press, 2010. 563 p.
2. Артюшенко В. М., Воловач В. И., Тяжев А. И. Моделирование непрерывных марковских процессов в дискретном времени на примере радиолокационных сигналов, описываемых стохастическими дифференциальными уравнениями // Радиотехника. 2016. № 12. С. 22–27.
3. Попков Ю. С. Рандомизация и энтропия в машинном обучении и обработке данных // Доклады Российской академии наук. Математика, информатика, процессы управления. 2022. Т. 504, № 1. С. 3–27.
4. Гмурман, В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика : учебник для вузов / В. Е. Гмурман. 12-е изд. Москва : Юрайт, 2025. 479 с.

РАЗРАБОТКА РОБАСТНОГО F-КРИТЕРИЯ ДЛЯ СРАВНЕНИЯ ДИСПЕРСИЙ ДВУХ ВЫБОРОК

АРТЮШЕНКО Владимир Михайлович, доктор технических наук,
заведующий кафедрой информационных
технологий и управляющих систем
*Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза,
летчика-космонавта А. А. Леонова – филиал ФГБОУ ВО «МИИГАиК»
141070, Россия, Королев, artuschenko@mail.ru*

ВОЛОВАЧ Владимир Иванович, доктор технических наук,
директор высшей школы передовых производственных технологий
*Поволжский государственный университет сервиса
445017, Россия, Тольятти, volovach.vi@mail.ru*

Аннотация. Разработан и проанализирован новый робастный F -критерий, сохраняющий работоспособность для выборок, извлеченных из распределений с произвольными, включая различающиеся, эксцессами. Предложены две статистические процедуры применения робастного F -критерия равенства дисперсий для двух выборок из распределений с любыми эксцессами.

Ключевые слова: негауссова выборка, моменты распределения, кумулянты, эксцесс, робастный критерий.

DEVELOPMENT OF A ROBUST F-TEST TO COMPARE THE VARIANCES OF TWO SAMPLES

ARTYUSHENKO Vladimir Mikhaylovich,
Doctor of Engineering Sciences,
head at the Department of information technology and control systems
*Technological University named after twice Hero of the Soviet Union,
pilot-cosmonaut A. A. Leonov - branch of FSBEI HE MIIGAiK
141070, Russia, Korolev, artuschenko@mail.ru*

VOLOVACH Vladimir Ivanovich, Doctor of Engineering Sciences,
director at the higher school of advanced manufacturing technologies
*Volga Region State University of Service
445017, Russia, Togliatty, volovach.vi@mail.ru*

Abstract. A new robust F -test was developed and analyzed, which retains performance for samples extracted from distributions with arbitrary, including different,

excesses. Two static procedures are proposed for applying the robust F -test of equality of variances for two samples from distributions with any excesses.

Keywords: non-Gaussian sampling, distribution moments, cumulants, kurtosis, robust criterion.

ВВЕДЕНИЕ

Известно [1], что классический F -критерий

$$S_1^2 / S_2^2 \leq F_\alpha(v_1, v_2) \quad (1)$$

используется для проверки возможного предположения о равенстве дисперсий. В [2] показано, что при отклонении данных от нормального закона распределения применять его становится, по меньшей мере, спорным.

Дальнейшим развитием критериального подхода является использование робастного F -критерия [3]. Вместе с тем использование названного критерия предполагает использование математического ожидания двух сравниваемых выборок, что обычно сложно получить в различных прикладных задачах.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Предложен робастный F -критерий, который позволяет проверять согласованность дисперсий двух выборок без предположений о равенстве эксцессов. Кроме того, описывается его применение в отдельных практически значимых случаях.

Запишем выборочную дисперсию генеральной совокупности

$$S^2 = \sum_{i=1}^n \left[(x_i - \bar{x})^2 / (n-1) \right],$$

которое и позволит моделировать неопределенность оценки измеряемого показателя x .

Фактически для описания негауссовой выборки можно использовать конечный набор моментов либо кумулянтов [4]. При этом использование кумулянтов может привести к отрицательным значениям ПРВ. Чтобы такого не происходило, требуется применять только первые два кумулянта.

Опуская ряд промежуточных преобразований, можно записать оператора дисперсии в виде:

$$D\left(\frac{S^2}{\sigma^2}\right) = \frac{2}{n-1} \left[1 + \left(1 - \frac{1}{n}\right) \frac{\gamma_2}{2} \right]. \quad (2)$$

Из (2) следует, что дисперсия случайной величины S^2/σ^2 определяется объемом выборки и эксцессом ПРВ.

Далее было получено выражение для числа степеней свободы

$$f = d(n-1),$$

где $d = \left[1 + \left(1 - \frac{1}{n}\right) \frac{\gamma_2}{2} \right]^{-1}$.

В случае одной выборки можно записать:

$$S_1^2/\sigma^2 \leq \chi_{f,\alpha}^2/f = F_\alpha(f, \infty).$$

Перейдем к построению робастного F -критерия для двух выборок. Этот критерий принимает следующий вид:

$$1/F_{\alpha/2}(f_2, f_1) \leq S_1^2/S_2^2 \leq F_{\alpha/2}(f_1, f_2),$$

или

$$S_1^2/S_2^2 \leq F_\alpha(f_1, f_2). \quad (3)$$

По выполнению условия (3) судят об однородности выборок.

В ходе исследования показано, что α -предел F -распределения определяется числом степеней свободы, зависящих как от объема выборок, так и от эксцессов распределений, что характеризует следующее выражение:

$$\begin{cases} \frac{S_1^2}{S_2^2} \leq F_\alpha(f_1, f_2); \\ f_i = d_i(n_i - 1); d_i = \left[1 + \left(1 - \frac{1}{n_i}\right) \frac{\gamma_{2,i}}{2} \right]^{-1}. \end{cases}$$

Для определения несмещенной выборочной оценки дисперсии σ^2 используем выражение:

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2.$$

В случаях практических вычислений может использоваться выражение:

$$\hat{\gamma}_2 \approx (n + 2)T - 3.$$

В заключение запишем выражение для минимального объема выборки, вновь опуская ряд математических преобразований. В результате, учитывая выражение (1), запишем

$$n \geq 30(1 + \gamma_2 / 2).$$

ВЫВОДЫ

Предложенные решения позволяют сравнивать дисперсии двух выборок, включая случай, когда данные могут быть получены для произвольных и различающихся эксцессов. В ходе применения подхода вводятся степени свободы и учитывается аппроксимация отношения выборочных дисперсий.

Список источников

1. Ахманов С. А., Дьяков Ю. Е., Чиркин А. С. Введение в статистическую радиофизику и оптику. Москва : Наука. 1981. 640 с.
2. Шеффе Г. Дисперсионный анализ. Москва : Наука, 1980. 512 с.
3. Мардиа К., Земроч П. Таблицы F -распределения и распределений, связанных с ним. Москва : Наука, 1984. 255 с.
4. Артюшенко В. М., Воловач В. И. Робастный подход при синтезе адаптивных блоков нелинейного преобразования с учетом конечного отношения сигнал/помеха на входе // Радиотехника. 2018. № 6. С. 129-135.

ЗВУКОВАЯ СТЕГАНОГРАФИЧЕСКАЯ СИСТЕМА С МНОГОУРОВНЕВЫМ ВСТРАИВАНИЕМ ИНФОРМАЦИИ

БЕЛОВА Ольга Александровна, старший преподаватель
кафедры «Информационная безопасность»
*Поволжский государственный университет
телекоммуникаций и информатики
443110, Россия, Самара, o.karaulova@psuti.ru*

Аннотация. Эффективность стеганографической системы определяется максимальным объемом встроенной информации без возможности обнаружения ее присутствия. В работе предлагается алгоритм увеличения передаваемой информации за счет использования многоуровневого встраивания двухкомпонентного контейнера в звуковой покрывающий объект.

Ключевые слова: стеганография, двухкомпонентный контейнер, метод наименьших значащих бит, многоуровневое встраивание.

SOUND STEGANOGRAPHIC SYSTEM WITH MULTI-LEVEL INFORMATION EMBEDDING

BELOVA Olga Alexandrovna, Senior Lecturer
at the Department of «Information security»
*Povolzhskiy state university of telecommunications and informatics
443110, Russia, Samara, o.karaulova@psuti.ru*

Abstract. The effectiveness of a steganographic system is determined by the maximum volume of embedded information without the possibility of detecting its presence. This paper proposes an algorithm for increasing the transmitted information by using multi-level embedding of a two-component container within an audio cover object.

Keywords: steganography, two-component container, least significant bit method, multi-level embedding.

ВВЕДЕНИЕ

Встраивание скрытой информации в область наименьших значащих бит представляет собой достаточно типичное решение. Существует большое

количество методов, использующих данную область для встраивания, при этом обеспечивая высокую степень маскировки, за счет предварительного анализа покрываемых объектов, что позволяет выполнять встраивание в те точки, где обнаружение бит сообщения осложнено [1]. Звуковые файлы без сжатия обладают большей информационной избыточностью, нежели графические, что позволяет задействовать большее количество младших слоев для встраивания [2]. Однако важно определить, каким образом будет стегоаналитик проверять данные слои на возможные скрытые сообщения [3].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для реализации многоуровневого встраивания предлагается использовать двухкомпонентный стеганографический контейнер [4–10], так как он позволяет в некоторой степени осуществить статистическую маскировку данных. Алгоритм работает следующим образом. Обработка информации в реальном времени реализуется в пределах фиксированного окна [5], определяющегося допустимой временной задержкой при передаче сигнала. В пределах окна задается количество слоев, в которые реализуется встраивание. В первую очередь заполняется старший из выбранных слоев, причем встраиваемый бит является результатом функции «ВИННИК», примененной к биту сообщения и биту, выбранному из старших (в данном случае незадействованных при встраивании) слоев покрываемого объекта [10]. После заполнения указанного слоя заполняется слой на уровень младше. При этом в качестве первой компоненты уже могут быть использованы как старшие битовые слои, так и заполненный битовый слой. Потом операция повторяется для оставшихся битовых слоев в диапазоне. Результатом встраивания является стegosистема, младшие битовые слои которой имеют встроенную информацию, имеющую статистические параметры, зависящие как от последовательности бит сообщения, так и от бит старших слоев покрываемого объекта [3, 11].

ВЫВОДЫ

Проведенные исследования показали, что младшие битовые слои звуковых покрываемых объектов имеют статистические параметры случайных битовых

последовательностей. Причем, в зависимости от рассмотренных звуковых объектов, количество этих слоев варьируется от двух до пяти. Таким образом, предлагаемый метод позволяет эффективно маскировать достаточно большие объемы данных. Следует заметить, что стегоаналитику не известно исходное содержимое младших битовых слоев [11], что позволяет предполагать, обнаружение встроенной информации в реальном времени будет представлять достаточно сложную задачу.

Список источников

1. Шакурский М. В., Караулова О. А., Карташевская Е. С. Устойчивость двухкомпонентной стеганографической системы к несанкционированному извлечению информации // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2022. № 4 (52). С. 20–27.
2. Шакурский М. В., Шакурский В. К. Оценка стойкости двухкомпонентной стеганографической системы // Успехи современной радиоэлектроники. 2015. № 11. С. 87–91.
3. Шакурский М. В., Козырева Н. И., Караулова О. А. Особенности использования NIST тестов для анализа битовых слоев покрывающих объектов в системах стеганографии // Инфокоммуникационные технологии. 2024. Т. 22, № 3(87). С. 41–48.
4. Шакурский М. В., Караулова О. А. Двухкомпонентная стеганографическая система на основе отношения линейных функций двух сигналов с размещением информативного сигнала в знаменателе функции встраивания сообщения // Инфокоммуникационные технологии. 2022. Т. 20, № 1. С. 118–124.
5. Шакурский М. В., Караулова О. А. Оценка маскировки сигнала двухкомпонентной стеганографической системой при оконной обработке информации // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2023. № 2 (54). С. 9–16.
6. Шакурский М. В. Формирование контейнера для стеганографической системы на основе сжимающих отображений // Радиотехника. 2015. № 2. С. 134–139.

7. Shakurskiy M. V., Volovach V. I., Shakurskiy V. K. Two-channel real-time steganographic system. DOI 10.1109/EWDTS.2014.7027074 // IEEE East-West Design and Test Symposium. 2014. P. 1-4.

8. Шакурский М. В. Математические модели двухкомпонентных инвариантных стеганографических систем, использующих различные алгоритмы связи встраиваемых сигналов // Вопросы защиты информации. 2018. № 2 (121). С. 3–8.

9. Шакурский М. В. Двухкомпонентная стеганографическая система встраивания информации в младшие биты звукового сигнала // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2021. № 4. С. 72–78.

10. Патент № 2815915 С1 Российская Федерация, МПК H04L 9/00. Способ сокрытия информации : № 2023108967 : заявл. 10.04.2023 : опубл. 25.03.2024 / М. В. Шакурский, В. Н. Козловский, О. А. Караулова ; заявитель ФГБОУ ВО «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики».

11. Буранова М. А., Карташевский В. Г., Самойлов М. С. Анализ статистических характеристик мультимедийного трафика узла агрегации в мультисервисной сети // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2014. № 4 (16). С. 63–69.

**АНАЛИЗ ПРОСТРАНСТВЕННОГО НЕРАВЕНСТВА
В ОБЕСПЕЧЕННОСТИ ЗЕЛЕНЫМИ ЗОНАМИ НА ОСНОВЕ
СЕМАНТИЧЕСКОЙ СЕГМЕНТАЦИИ СПУТНИКОВЫХ СНИМКОВ**

БРАЧУНОВА Ульяна Викторовна, кандидат технических наук,
доцент, доцент кафедры «Программная инженерия»
*Поволжский государственный университет
телекоммуникаций и информатики*
443010, Россия, Самара, u.brachunova@psuti.ru

АДАЕВ Илья Андреевич, магистрант
*Поволжский государственный университет
телекоммуникаций и информатики*
443010, Россия, Самара, ilya_adaev02@mail.ru

Аннотация. Для качественной урбанизации города требуется, помимо правильного устройства инфраструктуры, обеспечение различных рекреационных зон. Зеленые зоны города должны не просто существовать, но и равномерно распределяться по территории города, а также правильно располагаться для регулирования микроклимата районов. Подобные мероприятия по планированию городской среды являются серьезной аналитической работой, которая может быть оптимизирована с применением готовых продуктов семантической сегментации спутниковых снимков и геоинформационного анализа.

Ключевые слова: семантическая сегментация, спутниковые снимки, озелененность городской среды.

**ANALYSIS OF SPATIAL INEQUALITY
IN THE PROVISION OF GREEN AREAS BASED
ON SEMANTIC SEGMENTATION OF SATELLITE IMAGES**

BRACHUNOVA Ulyana Viktorovna,
Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Software Engineering
Volga Region State University of Telecommunications and Informatics
443010, Russia, Samara, u.brachunova@psuti.ru

ADAEV Ilya Andreevich, Master's student
Volga Region State University of Telecommunications and Informatics
443010, Russia, Samara, ilya_adaev02@mail.ru

Abstract. In addition to the proper infrastructure, high-quality urbanization requires the provision of various recreational areas. The green spaces of the city should not only exist, but also be evenly distributed throughout the city, as well as properly located to regulate the microclimate of the areas. Such urban planning activities are a significant analytical effort that can be optimized by using ready-made products for semantic segmentation of satellite images and geoinformation analysis.

Keywords: neural networks, semantic segmentation, satellite images, greening of the urban environment

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время темпы урбанизации нарастают. В данной сфере важность также начинает приобретать благоустройство зон отдыха, в том числе организация зеленых насаждений. Эти вопросы зачастую не рассматриваются в первую очередь, что является весомым просчетом, поскольку данные в исследовании Смолиной О. О. и Рябоненко К. Д. [1] показывают положительное влияние природных зон, а именно их способность смягчать температурные колебания и снижать уровень стресса у жителей.

Ключевой вызов при этом – резкая диспропорция в размещении таких территорий, ведущая к усилению социального и экологического неравенства. Для разработки взвешенной градостроительной стратегии требуется оперативный и достоверный мониторинг состояния природных активов города. Устаревшие методики, опирающиеся на наземные обследования, отличаются высокой ресурсоемкостью и медлительностью. Прорывным решением в этой области становится использование инструментов искусственного интеллекта, в частности, алгоритмов семантической сегментации для дешифрирования спутниковых изображений. Настоящая работа ставит своей целью выявить и измерить масштабы пространственной сегрегации в доступе к озелененным территориям на примере городских округов Самары.

Методика основана на комбинированном подходе, сочетающем использование готовых продуктов семантической сегментации ESA WorldCover

с последующей верификацией средствами геоинформационного анализа. Практическая ценность заключается в создании доступной методики мониторинга для муниципальных служб. Статья фокусируется на верификации и адаптации готовых продуктов сегментации для решения урбанистических задач.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Исследования проводились на основе анализа города Самары, чья структура идеально подходит для анализа: она сочетает районы с многоэтажной и промышленной застройкой, частный сектор и обширные периферийные территории, что обеспечивает репрезентативную выборку. Исходными материалами послужили растровые данные высокого разрешения ESA WorldCover (2021), а для административного деления – векторный слой с портала GADM.

Работа была разделена на два последовательных этапа. На этапе верификации и адаптации карты озеленения проводилась валидация готового продукта семантической сегментации ESA WorldCover для территории г. Самара, включая оценку точности классификации и адаптацию под особенности городской застройки.

На стадии предобработки были выделены следующие критерии:

- Исключение крайних районов (Красноглинский, Куйбышевский) в связи с высокой долей растительности при низкой плотности населения.
- Анализ Кировского района только в пределах жилой застройки с исключением удаленных лесных массивов.
- Использование только районов городской черты для проведения анализа.
- Исключение частей районов, включающих лесные массивы за чертой города.

На основе этих критериев были созданы векторные маски, а затем растровые изображения районов.

Конечный результат продемонстрирован на рис. 1.

Полученная маска была наложена на слой административных границ. Для каждого района были автоматически рассчитаны целевые показатели: доля

зеленых зон от общей площади (%) и их площадь в пересчете на одного жителя (кв. м/чел.), представленные в табл. 1.

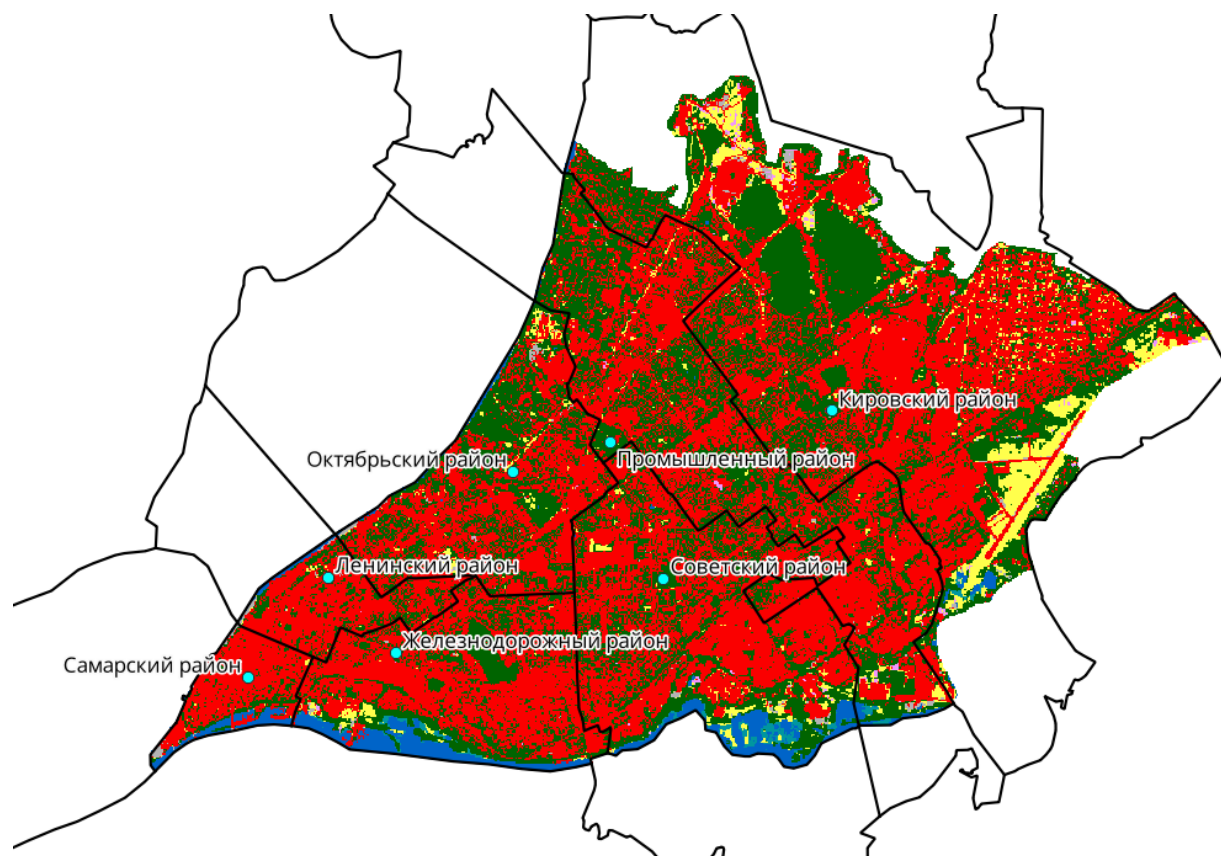


Рис. 1. Распределение зеленых насаждений по территории г. Самары

Таблица 1

*Показатели обеспеченности зелеными насаждениями
по районам г. Самары*

Название района	Население (кол-во человек)	Площадь зеленых насаждений относительно общей площади (%)	Площадь зеленых насаждений в расчете на одного жителя (кв. м/чел)
Самарский	30 989	15,47	22,19
Кировский	218 657	41,03	103,63
Железнодорожный	90 133	29,72	56,35
Ленинский	61 542	22,38	20,38
Советский	166 867	33,36	51,29
Октябрьский	134 393	40,27	50,94
Промышленный	268 899	40,44	44,53

Результаты выявили значительные межрайонные различия. Наблюдается тенденция к более низким показателям в центральных густонаселенных районах (Ленинский, Самарский) по сравнению с периферийными (Кировский, Октябрьский). Стоит отметить, что Кировский район представляет особый методологический интерес как территория со смешанной структурой. Его включение демонстрирует, что показатель «площадь зеленых насаждений на человека» без дополнительного анализа доступности может давать искаженную картину. Высокий формальный показатель (103,6 м²/чел) маскирует внутреннюю неоднородность и проблему доступности зелени для жителей удаленных кварталов.

Данные о количестве жителей в каждом районе взяты за 2022 год по информации администрации Самары.

Особенностью методики является использование готового классифицированного раstra ESA WorldCover, созданного с применением нейросетевых алгоритмов семантической сегментации. Наш вклад заключался в разработке GIS-пайплайна для:

- верификации точности классификации для городской среды Самары;
- адаптации данных под административное деление города;
- расчета аналитических показателей для оценки пространственного неравенства.

ВЫВОДЫ

Проведенное исследование подтвердило эффективность разработанной геоинформационной методики для оценки пространственного неравенства в распределении зеленых зон Самары. На основе анализа готовых продуктов семантической сегментации спутниковых снимков (ESA WorldCover) получены количественные показатели обеспеченности населения зелеными насаждениями.

Ключевые выводы:

- Подтвержден значительный дисбаланс между районами – показатели отличаются более чем в 5 раз.

- Четко прослеживается градиент от центра к периферии: минимальная обеспеченность в Ленинском районе (20,38 м²/чел), максимальная – в Кировском (103,63 м²/чел).
- Выявлена нелинейная зависимость: высокая общая площадь зеленых насаждений не гарантирует их доступности для населения.

Практическая значимость методики заключается в ее оперативности, адаптивности к различным городским условиям и умеренных требованиях к вычислительным ресурсам, что делает ее применимой в работе муниципальных служб.

Перспективы развития связаны с использованием материалов аэрофото-съемки высокого разрешения для детального учета зелени и интеграцией с социально-демографическими данными, что позволит перейти от констатации неравенства к комплексному анализу экологической справедливости.

Таким образом, работа представляет готовый инструмент для мониторинга и планирования городской среды с подтвержденной эффективностью, способствующий выравниванию условий жизни в разных частях города.

Список источников

1. Смолина О. О., Рябоненко К. Д. Озеленение городской среды: восприятие и воздействие на психоэмоциональное состояние человека // Качество. Технологии. Инновации : материалы VIII Международной научно-практической конференции, Новосибирск, 12–14 февраля 2025 года. Новосибирск : Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет, 2025. С. 381–389. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_82690378_25373666.pdf (дата обращения: 20.11.2025). Режим доступа: для авториз. пользователей.
2. Захаров В. Л., Побережский С. Ю., Смирнов Д. В. Методы применения средств космического наблюдения // Известия Института инженерной физики. 2021. № 2 (60). С. 27–29. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_45684233_93686654.pdf (дата обращения: 22.11.2025). Режим доступа: для авториз. пользователей.
3. Фролов И. И., Перцев Д. Ю., Куприянова Д. В. Обзор алгоритмов определения объектов на спутниковых снимках земной поверхности // Big Data and

Advanced Analytics. 2021. № 7–1. С. 95-101. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_46482787_12503182.pdf (дата обращения: 21.11.2025). Режим доступа: для авториз. пользователей.

4. Жучков Д. В., Макаренко В. П. Роль зелёных насаждений в формировании комфортной городской среды // Вестник ПГУ им. Шолом-Алейхема. 2023. № 3 (52). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/rol-zelyonyh-nasazhdeniy-v-formirovanii-komfortnoy-gorodskoy-sredy> (дата обращения: 22.11.2025). Доступна на сайте КиберЛенинка.

5. Иванова Ю. П., Иванова О. О. Влияние зеленых насаждений на формирование городской среды. DOI: 10.5281/zenodo.4459076 // Innovative Scientific Research. 2021. № 1-1 (3). С. 108. URL: <https://zenodo.org/records/4459076> (дата обращения: 22.11.2025).

6. Ревич Б. А. Значение зеленых пространств для защиты здоровья населения городов // Анализ риска здоровью. 2023. № 2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/znachenie-zelenyh-prostranstv-dlya-zaschity-zdorovya-naseleniya-gorodov> (дата обращения: 21.11.2025). Доступна на сайте КиберЛенинка.

7. Жучков Д. В., Фетисов Д. М. Оценка современного состояния растительного покрова г. Облучье по мультиспектральным данным. DOI 10.31433/2618-9593-2024-27-1-112-124 // Региональные проблемы. 2024. Т. 27, № 1. С. 112-124. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_64547218_84073617.pdf (дата обращения: 23.11.2025). – Режим доступа: для авториз. пользователей.

8. Сулайманов И. М., Эримбетов Т. Х., Абдикаиров Б. Е. Фрагментация растительного покрова на примере Республики Каракалпакстан // Academic research in educational sciences. 2023. № 11. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/fragmentatsiya-rastitelnogo-pokrova-na-primere-respubliki-karakalpakstan> (дата обращения: 20.11.2025). Доступна на сайте КиберЛенинка.

9. Тесаловский А. А., Анисимов Н. В. Система мониторинга зеленых насаждений на урбанизированных территориях // Московский экономический журнал. 2023. № 1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sistema-monitoringa-zelyonyh-nasazhdeniy-na-urbanizirovannyh-territoriyah> (дата обращения: 19.11.2025). Доступна на сайте КиберЛенинка.

10. Соколов А. С. Геоинформационные системы в экологии и природопользовании. Работа с данными дистанционного зондирования Земли : практическое пособие. Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины, 2024. 44 с. URL: <https://reader.lanbook.com/book/449708#2> (дата обращения: 23.11.2025). Режим доступа: для авториз. пользователей. ISBN 978-985-32-0055-3.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ AR-РЕКЛАМЫ ЗА СЧЕТ РЕАЛИЗАЦИИ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ

ВЕПРЕВА Анастасия Денисовна, бакалавр
*Поволжский государственный университет
телекоммуникаций и информатики
443010, Россия, Самара, n.vepreva.dn@gmail.com*

СТЕФАНОВА Ирина Алексеевна,
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры
«Информатика и робототехнические системы»
*Поволжский государственный университет
телекоммуникаций и информатики
443010, Россия, Самара, aistivt@gmail.com*

Аннотация. В данной статье рассматривается проблема повышения эффективности рекламных компаний за счет внедрения технологий дополненной реальности (AR). Были проанализированы современные алгоритмы компьютерного зрения, лежащие в основе AR-систем, такие как методы сопоставления ключевых точек (SIFT, ORB) и платформенные решения (Vuforia, OpenCV). Выявлены ключевые сложности, связанные с нестабильностью трекинга в условиях изменчивого освещения и частичного перекрытия отслеживаемых маркеров. Основным результатом исследования является разработанная автором модель веб-сайта трекинга, комбинирующая маркерные и маркерлессные методы на базе OpenCV.

Ключевые слова: дополненная реальность, компьютерное зрение, AR-систем, маркерный метод, Vuforia, OpenCV.

INCREASING THE EFFICIENCY OF AR ADVERTISING BY IMPLEMENTING COMPUTER VISION

VEPREVA Anastasia Denisovna, bachelor
*Volga State University of Telecommunications and Informatics,
443010, Russia, Samara, n.vepreva.dn@gmail.com*

STEFANOVA Irina Alekseevna, Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor, Associate Professor at the Department
of Computer Science and Robotic Systems

Abstract. This article examines the problem of increasing the effectiveness of advertising campaigns through the implementation of augmented reality (AR) technologies. Modern computer vision algorithms underlying AR systems, such as key-point matching methods (SIFT, ORB) and platform solutions (Vuforia, OpenCV), were analyzed. Key challenges related to tracking instability under variable lighting conditions and partial occlusion of tracked markers were identified. The main result of the study is a website tracking model developed by the author, combining marker-based and marker less methods based on OpenCV.

Keywords: augmented reality, computer vision, AR systems, marker-based method, Vuforia, OpenCV.

ВВЕДЕНИЕ

Современный цифровой маркетинг столкнулся с проблемой «баннерной слепоты» и снижения вовлеченности аудитории при использовании традиционных форматов. В этом контексте технологии дополненной реальности (AR) открывают новые возможности для создания иммерсионного и персонализированного контента. Исследования, такие как отчет NielsenIQ, показывают, что AR-реклама способна повышать запоминаемость бренда до 70 % по сравнению с традиционными методами. Однако широкое внедрение AR-решений в рекламные кампании сдерживается рядом нерешенных научно-технических задач.

Ключевой проблемой является обеспечение устойчивого и точного трекинга в неконтролируемых условиях внешней среды. Работы таких авторов, как Азума [1], заложили теоретическую базу для дополненной реальности, определив ключевые компоненты системы. Исследования Милгрэма и Кишино [2] предлагают таксономию смешанной реальности, полезную для классификации рекламных приложений. Современные платформы, такие как Vuforia [3], демонстрируют высокую эффективность, но их использование сопряжено с лицензионными ограничениями и «закрытостью» алгоритмов, что затрудняет их адаптацию под узкоспециализированные задачи. С другой стороны, open-source

библиотеки (OpenCV) предоставляют гибкость, но требуют значительных усилий по разработке и оптимизации стабильных алгоритмов трекинга, особенно в условиях перекрытия маркеров и изменчивого освещения [1, 2]. Проведенный анализ показал, что существующие решения часто ориентированы либо на маркерные, либо на маркерлессные методы, в то время как их синергетическое использование исследовано недостаточно.

Целью данной работы является повышение эффективности и стабильности систем компьютерного зрения для AR-рекламы за счет разработки и апробации гибридной модели трекинга.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

1. Провести сравнительный анализ алгоритмов компьютерного зрения (SIFT, ORB, AKAZE) применительно к задаче маркерного и маркерлессного (Markerless Tracking) трекинга.
2. Разработать архитектурную модель гибридной системы, динамически переключающейся между режимами трекинга в зависимости от качества распознавания окружения.
3. Реализовать функциональный прототип веб-сайта на базе фреймворка AR.js и OpenCV для демонстрации практической применимости модели.
4. Провести экспериментальную оценку стабильности работы предложенного решения в сравнении с базовыми методами.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На основе проведенного анализа алгоритмов компьютерного зрения была разработана и реализована гибридная модель трекинга, комбинирующая два режима для обеспечения максимальной стабильности в WebAR-приложениях.

Маркерный трекинг (на основе ORB) обеспечивает быструю и точную инициализацию AR-контента при наличии в кадре заранее подготовленного маркера. Маркерлессный трекинг (на основе AKAZE) активируется при потере маркера, обеспечивая непрерывность трекинга за счет отслеживания ключевых точек естественного окружения.

Практической реализацией и демонстрацией работы предложенной модели стал функциональный прототип веб-сайта «Flower shop». Технологический стек реализации: JavaScript, фреймворк AR.js (для маркерного трекинга), библиотека OpenCV.js (для реализации логики маркерлессного трекинга) и A-Frame (для отображения 3D-моделей).

Работа прототипа заключается в следующем: пользователь с помощью мобильного устройства сканирует специальный маркер (рис. 1), что приводит к инициализации и отображению 3D-модели цветка в дополненной реальности (рис. 2). Ключевым преимуществом прототипа является его способность сохранять стабильное положение виртуального объекта даже при частичном или полном перекрытии исходного маркера, благодаря качественному переходу на маркерлессный трекинг окружения.



Рис. 1. Маркер для инициализации AR-контента на веб-сайте «Flower shop»



*Рис. 2. Результат работы системы:
3D-модель цветка, отображаемая через браузер
в режиме дополненной реальности*

Для оценки эффективности гибридного подхода был проведен контролируемый эксперимент, в ходе которого фиксировалось количество сбоев трекинга (полное исчезновение виртуального объекта) при преднамеренном создании помех. Результаты эксперимента подтвердили гипотезу о повышении стабильности: предложенная гибридная модель позволила снизить количество сбоев на 15 % по сравнению с использованием только маркерного метода в одинаковых условиях. Это доказывает практическую ценность разработанного решения для создания устойчивых рекламных продуктов.

ВЫВОДЫ

Проведенное исследование позволило достичь поставленной цели и решить основные задачи:

- Разработана и реализована гибридная модель трекинга для WebAR-приложений, сочетающая маркерные (ORB) и маркерлессные (AKAZE) методы компьютерного зрения.
- Создан функциональный прототип веб-сайта «Flower shop» с интеграцией AR-технологий, демонстрирующий практическую применимость предложенного решения.
- Экспериментально подтверждена эффективность гибридного подхода: стабильность трекинга повышена на 15 % по сравнению с базовыми методами;
- Доказана перспективность использования разработанного решения для создания интерактивной AR-рекламы, способной работать непосредственно в веб-браузере без установки дополнительных приложений.
- Полученные результаты открывают возможности для дальнейшего совершенствования систем компьютерного зрения в области цифрового маркетинга и электронной коммерции.

Список источников

1. Azuma R. T. A Survey of Augmented Reality // Teleoperators and Virtual Environments 1997. Vol. 6, Iss. 4. P. 355–385.

2. Milgram P., Kishino F. A taxonomy of mixed reality visual displays // IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems. 1994. Vol. E77-D, No. 12. P. 1321–1329.
3. Руководство разработчика Vuforia Engine // PTC. 2023. URL: <https://developer.vuforia.com/> (дата обращения: 01.11.2023).
4. Bradski G., Kaehler A. Learning OpenCV: Computer Vision with the OpenCV Library. Sebastopol : O'Reilly Media, 2008. 555 p.
5. ORB: An efficient alternative to SIFT or SURF / E. Rublee et al. DOI:10.1109/ICCV.2011.6126544 // 2011 International Conference on Computer Vision. IEEE, 2011. P. 2564–2571.
6. Alcantarilla P. F., Nuevo J., Bartoli A. Fast Explicit Diffusion for Accelerated Features in Nonlinear Scale Spaces. DOI:10.5244/C.27.13 // British Machine Vision Conference (BMVC). 2013. 12 p.
7. OpenCV documentation index // OpenCV : сайт. URL: <https://docs.opencv.org/> (дата обращения: 15.11.2024).

**УЧЕТ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ МАТЕРИАЛОВ
МЕЖЭЛЕМЕНТНЫХ И МЕЖУРОВНЕВЫХ
СОЕДИНЕНИЙ 6Т-ЯЧЕЕК ПАМЯТИ
НА ИХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ**

ВИННИК Марина Андреевна, студентка
*УО «Национальный детский технопарк»
220114, Республика Беларусь, Минск*

КРИВЕЦ Кирилл Андреевич, студент
*УО «Национальный детский технопарк»
220114, Республика Беларусь, Минск*

ЛОВШЕНКО Иван Юрьевич, старший преподаватель
кафедры микро- и наноэлектроники
*Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
220013, Республика Беларусь, Минск, lovshenko@bsuir.by*

СТЕПАНОВ Андрей Анатольевич, кандидат технических наук,
доцент, доцент кафедры микро- и наноэлектроники
*Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
220013, Республика Беларусь, Минск, stepanov@bsuir.by*

КОРСАК Кирилл Витальевич, аспирант
*Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
220013, Республика Беларусь, Минск, k.korsak@bsuir.by*

НОВИКОВ Павел Эдуардович, аспирант
*Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
220013, Республика Беларусь, Минск, p.novikov@bsuir.by*

Аннотация. В работе исследуется влияние материалов металлизации на времена задержки и статический запас по шуму (SNM) ячеек статической памяти. В программном комплексе Silvaco проведен сравнительный анализ 11 приборных структур с различными комбинациями материалов четырех уровней металлизации. Установлено, что использование меди во всех слоях обеспечивает оптимальное соотношение быстродействия и надежности. Полученные

результаты демонстрируют возможность повышения эксплуатационных характеристик ячеек памяти за счет оптимизации материалов межсоединений.

Ключевые слова: ячейки памяти, металлизация, быстродействие, надежность, Silvaco.

**INFLUENCE OF INTER-ELEMENT
AND INTER-LEVEL INTERCONNECT MATERIALS
PARAMETERS ON THE OPERATIONAL
CHARACTERISTICS OF 6T MEMORY CELLS**

VINNIK Marina Andreyevna, student
*National Children's Technopark
220114, Republic of Belarus, Minsk*

KRIVETS Kirill Andreyevich, student
*National Children's Technopark
220114, Republic of Belarus, Minsk*

LOVSHENKO Ivan Yuryevich, Senior Lecturer
at the Department of Micro- and Nanoelectronics
*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
220013, Republic of Belarus, Minsk, lovshenko@bsuir.by*

STEPANOV Andrey Anatolievich, Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor, Associate Professor at the Department
of Micro- and Nanoelectronics
*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
220013, Republic of Belarus, Minsk, k.korsak@bsuir.by*

KORSAK Kirill Vitalievich, PhD student
*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
220013, Republic of Belarus, Minsk, k.korsak@bsuir.by*

NOVIKOV Pavel Eduardovich, PhD student
*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
220013, Republic of Belarus, Minsk, p.novikov@bsuir.by*

Abstract. This paper investigates the influence of metallization materials on speed performance (delay) and static noise margin (SNM) of static memory cells. A comparative analysis of 11 device structures with different combinations of materials for four levels of metallization was conducted in the Silvaco software.

It was established that the use of copper in all layers provides an optimal balance of speed and reliability. The obtained results demonstrate the possibility of improving operational characteristics of memory cells through optimization of interconnection materials.

Keywords: memory cells, metallization, speed performance, reliability, Silvaco.

ВВЕДЕНИЕ

Современные технологии проектирования интегральных микросхем сталкиваются с проблемой паразитных эффектов в межсоединениях, которые критически влияют на быстродействие и надежность устройств, в частности элементов памяти [1]. По мере масштабирования технологических норм, уменьшения сечения проводников и увеличения плотности тока выбор материалов металлизации становится одним из определяющих факторов для повышения эксплуатационных характеристик [2]. Если на ранних этапах развития микроэлектроники алюминий являлся стандартным материалом для межсоединений благодаря технологичности и совместимости с кремнием, то в современных технологиях его заменяют материалы с лучшими электрофизическими параметрами [3].

Особенно критичен выбор материалов для ячеек статической памяти (SRAM), которые формируют кэш-память процессоров и требуют максимального быстродействия при высокой надежности хранения данных. В данной работе исследуется влияние материалов металлизации на два ключевых параметра ячеек памяти: времена задержки переключения состояния и статический запас по шуму (SNM).

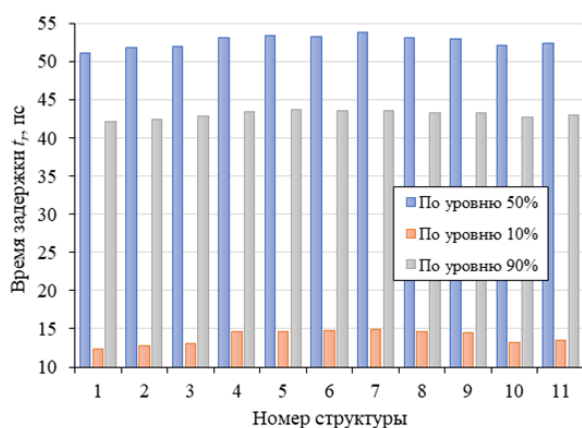
РЕЗУЛЬТАТЫ

В ходе исследования рассмотрены 11 приборных структур с различными комбинациями материалов четырех уровней металлизации (табл. 1). В качестве материалов использовались медь, алюминий, вольфрам, никель, кобальт, золото и серебро в различных комбинациях по уровням. Моделирование проводилось в программном комплексе Silvaco для 3D-представления типовой схемы 6Т-ячейки памяти, выполненной по технологическому процессу 350 нм.

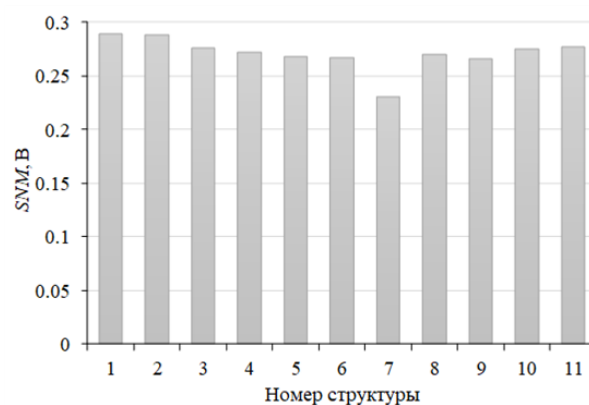
*Варьирование материалов каждого слоя металлизации
для приборных структур*

Номер структуры	Уровень металлизации				Номер структуры	Уровень металлизации			
	M1	M2	M3	M4		M1	M2	M3	M4
1	Cu	Cu	Cu	Cu	7	W	W	W	W
2	W	Cu	Cu	Cu	8	Ni	Ni	Ni	Ni
3	W	Al	Cu	Cu	9	Co	Co	Co	Co
4	W	Al	Al	Cu	10	Au	Au	Au	Au
5	W	Al	Al	Al	11	Ag	Ag	Ag	Ag
6	Al	Al	Al	Al	—	—	—	—	—

Анализ временных характеристик показал значительную зависимость скорости переключения состояния ячейки памяти от выбора материалов металлизации. На рис. 1а представлены результаты компьютерного моделирования влияния набора материалов уровней металлизации на времена задержки при переключении.



а



б

Рис. 1. Результат исследования влияния набора материалов уровней металлизации на времена задержки (а) и SNM (б)

Минимальное время задержки (51,122 пс) достигается при использовании меди на всех уровнях металлизации (структура номер 1). Замена меди на материалы с более высоким сопротивлением приводит к увеличению задержек, особенно

при использовании вольфрама во всех слоях (структура номер 7) – время задержки возрастает до 53,778 пс. Это объясняется высоким удельным сопротивлением вольфрама, которое приводит к увеличению RC-задержек и увеличенным падением напряжения на межсоединениях. Одновременно с анализом быстродействия исследовалось влияние материалов металлизации на статический запас по шуму (SNM), определяющий надежность хранения данных в ячейке памяти при наличии внешних помех. На рис. 16 представлены результаты исследования влияния материалов на SNM. Аналогично максимальное значение SNM (0,289 В) также достигается при использовании меди во всех слоях металлизации, а наименьшее (0,231 В) – при использовании вольфрама.

ВЫВОДЫ

Проведенное исследование показало, что выбор материалов металлизации оказывает существенное влияние на эксплуатационные характеристики ячеек памяти. Использование меди во всех четырех уровнях металлизации обеспечивает оптимальные минимальное время задержки (51,122 пс) и статический запас по шуму (0,289 В). Альтернативные материалы, такие как золото и серебро, показывают хорошие результаты по SNM (0,275 В и 0,277 В соответственно), но их применение ограничено высокой стоимостью и технологическими сложностями в интеграции с кремниевой технологией.

Список источников

1. Amrutur B. S., Horowitz M. A. Speed and Power Scaling of SRAM's. DOI:10.1109/4.823443 // IEEE Journal of Solid-State Circuits. 2000. V. 35, № 2. P. 175–185.
2. Kim, H.-W. Recent Trends in Copper Metallization/ DOI:10.3390/electronics11182914 // Electronics. 2022. V. 11, № 18. P. 2914.
3. Besser P. R. Current challenges with copper interconnects. DOI:10.1149/1.2408858 // ECS Transactions. 2007. 10 p.

**ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ
ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ
ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ АВИАЦИОННЫХ
СИСТЕМ МОНИТОРИНГА В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ**

ВОРГАНОВ Александр Александрович,
заместитель начальника кафедры воздушно-космических
сил военного учебного центра при МИРЭА
Российский технологический университет
119454, Россия, г. Москва, voranov_a@mirea.ru

КОТЕНЕВ Евгений Викторович, аспирант
Московский финансово-юридический университет
109544, Россия, г. Москва, kotenew@bk.ru

КОТЕНЕВ Матвей Евгеньевич, студент
Севастопольский государственный университет
299053, Россия, Севастополь, matvey.kotenev2007@bk.ru

Аннотация. Беспилотные летательные аппараты (БПЛА), являясь составной частью беспилотных автоматизированных систем, могут выполнять различные задачи, в зависимости от их предназначения и целевой нагрузки. БПЛА мониторинга являются одним из эффективных и перспективных средств сбора данных об окружающей обстановке (ситуационной осведомлённости) и выполняют задачи в непосредственной близости к объектам мониторинга. Системы мониторинга относятся к сложным, территориально распределённым системам, в которых может существовать ряд контуров обращения и обработки информации. В связи с этим в данной статье предложены основные направления и концепции по обеспечению информационной безопасности циркуляции информации в беспилотных авиационных системах, состоящих из множества беспилотных летательных аппаратов мониторинга и наземных пунктов управления, в том числе мобильных и маневренных.

Ключевые слова: беспилотные авиационные системы, беспилотные летательные аппараты, мониторинг, обработка информации, информационная безопасность, защита информации.

MAIN DIRECTIONS FOR ENSURING INFORMATION SECURITY OF UNMANNED AVIATION MONITORING SYSTEMS IN MODERN CONDITIONS

VORGANOV Alexander Alexandrovich, Deputy Head of the
Department of Aerospace Forces of the Military Training Center
Russian Technological University
119454, Russia, Moscow, voranov_a@mirea.ru

KOTENEV Evgeny Viktorovich, PhD student
Moscow University of Finance and Law
109544, Russia, Moscow, kotenew@bk.ru

KOTENEV Matvey Evgenyich, student
Sevastopol State University
299053, Russia, Sevastopol, matvey.kotenev2007@bk.ru

Abstract. Unmanned aerial vehicles (UAVs) can perform various tasks, depending on their purpose and target load. Monitoring UAVs are one of the effective and promising means of collecting data on the environment (situational awareness) and perform tasks in close proximity to monitoring facilities. Monitoring systems belong to complex, geographically distributed systems in which a number of information handling and processing loops can exist. In this regard, this article proposes the main directions and concepts for ensuring information security of information circulation in unmanned aircraft systems.

Keywords: unmanned aerial systems, unmanned aerial vehicles, monitoring, information processing, information security, information protection.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие беспилотных авиационных систем (БАС) стало одним из важных приоритетов развития страны в XXI веке. Руководство России с 2022 г. уделяет значительное внимание развитию БАС. В декабре 2022 года Президент РФ утвердил перечень поручений по вопросам развития БАС, которые включили в себя создание Стратегии развития отрасли до 2030 года и на перспективу до 2035 года, а также запуск Национального проекта по развитию беспилотных авиационных систем. В апреле 2023 года Президент РФ утвердил перечень

поручений по итогам мероприятий по вопросам развития беспилотных авиационных систем. В июне 2023 года принята Стратегия развития беспилотной авиации Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2035 года. В сентябре 2023 года Правительством РФ был утвержден национальный проект «Беспилотные авиационные системы».

Применение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в современных условиях интенсивного развития инфокоммуникационных услуг и активной информатизации является перспективным драйвером в различных сферах развития государства и общества, в т. ч. экономики, безопасности и других направлениях. Это стало возможным благодаря глобальной трансформации авиации, происходящей в настоящее время, а именно переходу от авиации, управляемой человеком-пилотом или экипажем (естественным интеллектом), к автономной авиации, управляемой искусственным интеллектом, промежуточным этапом которой является беспилотная авиация, управляемая дистанционно человеком-оператором беспилотного летательного аппарата.

Человеческие возможности имеют пределы, которые поступательно расширяются. Для повышения возможностей человека применяют различные способы и методы, одним из которых традиционно является автоматизация труда, но в современных условиях прорывным достижением является применение искусственного интеллекта [1].

Резюмируя, возможно сделать вывод о том, что беспилотные авиационные системы являются приоритетом развития страны. Национальный проект по развитию беспилотных авиационных систем, запущенный руководством страны в 2023 году, имеет целью расширение сферы применения БПЛА и должен привести к росту инвестиционного потенциала технологий и разработок в данной сфере.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Беспилотные летательные аппараты, используемые для функционирования авиационных систем различного назначения, – это одно из перспективных направлений в развитии современной науки, реализации научных достижений

в технике. Одним из составляющих таких систем являются беспилотные летательные аппараты различного мониторинга. Основная функция, которую выполняют данные устройства, заключается в сборе визуальных, тепловизионных, радиочастотных и иных данных об окружающей обстановке или об объекте мониторинга, их первичной обработке и дальнейшей трансляции для следующего этапа обработки на наземном пункте управления беспилотными авиационными системами. Важность при этом приобретают разработанные модели, методы и способы передачи, хранения и обработки информации, которые обеспечивают работоспособность беспилотных авиационных систем. Авторами проанализированы научные подходы и технологические решения, опубликованные рядом исследователей в данной области.

На основании публикаций, изученных авторами, очевидным является тот факт, что сфера передачи данных, в т. ч. аудио- и видеоинформации, а также картографической и иной информации испытывает непрерывный рост объемов данных [2]. На практике реализация данной тенденции требует развития методов и способов передачи, хранения и обработки данных, в т. ч. их анализа, как это отображено в источниках [3, 6]. В дополнение к этому важно учитывать существующие характеристики и динамику процессов, присущих системам, работающим с большими массивами (объемами) данных, что подразумевает детальное научное исследование таких систем и моделирование их развития, на что указывают работы [4, 5]. В свою очередь, важно осознавать необходимость использования эффективных и надежных стратегий обеспечения информационной безопасности в системах, упомянутых в исследованиях [7], где циркулируют и обрабатываются большие объемы данных.

Ознакомившись с рядом исследований [8, 9], в которых тщательно рассмотрены фундаментальные концепции и стратегии, способствующие значительному улучшению и поддержанию оптимального уровня информационной безопасности различных систем, возможным является сделать вывод о целесообразности применения таких в беспилотных авиационных системах. Кроме того, рассмотрев вышеуказанные стратегии, стоит подчеркнуть, что обеспечение гарантированной защиты информации в системах передачи данных беспилотных

летательных аппаратов, которые в основном оперируют в условиях времени близком к реальному, является критически важным для их применения и совершенствования.

Информационная безопасность в области применения беспилотных авиационных систем, выполняющих задачи мониторинга, стоит в ряду первоочередных задач. Такие системы активно используют средства организации связи и передачи информации между наземным пунктом управления беспилотными авиационными системами и беспилотными летательными аппаратами с целью обеспечения надежной передачи информации между БПЛА и конечными пользователями полученных данных. Одновременно с пониманием важности информационной безопасности систем управления и передачи данных необходимо признать, что существуют актуальные проблемы в существующих и применяемых разработках в области информационной безопасности беспилотных авиационных систем. Отдельно стоит отметить, что вышеуказанные проблемы минимизируются при применении защищенных коммуникационных каналов, как это наблюдается в ряде существующих систем, однако применение таковых для передачи данных с беспилотными летательными аппаратами на сегодняшний день затруднено, т. к. увеличивает массогабаритные характеристики БПЛА.

Для гарантированного обеспечения безопасности систем связи и передачи информации, которая используется в беспилотных авиационных системах для связи с беспилотными летательными аппаратами и особенно в тех БПЛА, которые применяются для мониторинга, необходимо применять целостный метод, который бы включал в себя рассмотрение всех факторов, влияющих на эту область. Рассмотрев вопрос обеспечения информационной безопасности как аспекта оценки рисков, в ходе которого необходимым является принимать в расчет вероятность потенциального урона информационной безопасности от несанкционированного доступа к защищаемым данным, а также вероятность их искажения путем изменения или утраты, включая риски, связанные с организованным извне нарушением работы программного обеспечения системы. Следовательно, важной составляющей информационной безопасности является защита информации от несанкционированного доступа.

Беспилотные авиационные системы мониторинга состоят из технической и организационной основы. Техническая основа беспилотных авиационных систем подразделяется на средства беспилотной авиации, средства управления ими, расположенные на наземных пунктах управления (НПУ), а также средства связи и автоматизации.

Защита информации от несанкционированного доступа включает комплекс действий, целью которых является предотвращение доступа к защищаемым данным без соответствующего разрешения – наличия прав на доступ, полученных установленным для системы порядком, а также предотвращение непреднамеренного влияния на них других технических средств. Обеспечение защиты информации (рис. 1) от несанкционированного доступа актуально и в контексте передачи данных беспилотных летательных аппаратов мониторинга и включает в себя комплекс мер, согласованных по месту и времени, всесторонний набор методов и способов, инструментов и процедур, имеющих целью минимизировать воздействие сил и средств, без наличия прав на данный доступ, предотвратить влияние любых технических средств на деятельность БПЛА. Основные направления по обеспечению информационной безопасности беспилотных авиационных систем, в т. ч. выполняющих задачи мониторинга, представлены на рис. 1.



Рис. 1. Основные направления по обеспечению информационной безопасности беспилотных авиационных систем, в т. ч. выполняющих задачи мониторинга

ВЫВОДЫ

Для дальнейшего анализа основных направлений обеспечения информационной безопасности беспилотных авиационных систем используются различные элементы, инструменты и подходы, которые способствуют сохранению конфиденциальности информации в данных системах.

Важно подчеркнуть повышенную значимость обеспечения конфиденциальности данных при их пересылке информационных данных мониторинга с беспилотных авиационных систем на наземные пункты управления. С одной стороны, необходимо стремиться к сокращению объема передаваемых данных, с другой – к повышению качества данных мониторинга, т. е. повышению эффективности радиосвязи. Кроме того, критически важно гарантировать передачу данных и надежную защиту передачи от воздействия средств радиоэлектронного подавления или вмешательства, любых других угроз в области беспилотной авиации [10].

Список источников

1. Ворганов А. А., Котенев Е. В. Перспективные информационно-аналитические технологии менеджмента с применением теории массового обслуживания в условиях цифровизации // Менеджмент в условиях цифровизации: теория и практика : материалы XXIII Международной научно-практической конференции, Орел, 28–29 ноября 2024 года. Орел : Орловский государственный университет им. И. С. Тургенева, 2025. С. 994–1000.

2. Ворганов А. А., Котенев Е. В., Кремер В. А. Проблемы радиоэлектронного подавления радиотехнических средств управления и передачи данных БПЛА с модами ОВЧ - УВЧ диапазона с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты // Информационные технологии. Радиоэлектроника. Телекоммуникации (ITRT-2024) : материалы XI Международной заочной научно-технической конференции, Тольятти, 29 ноября 2024 года. Тольятти : ПВГУС, 2025. С. 495–502.

3. Рекурсивно-регрессионная самоорганизация моделей анализа и контроля сложных систем / В. В. Мокшин, И. М. Якимов, Р. М. Юльметьев, А. В. Мокшин // Нелинейный мир. 2020. Т. 7, № 1. С. 66–76.

4. Обучение имитационному моделированию в пакете Simulink системы MatLAB / И. М. Якимов, А. П. Кирпичников, В. В. Мокшин, Т. А. Мухутдинов // Вестник технологического университета. 2015. Т. 18, № 5. С. 184–188.
5. Сайфудинов И. Р., Мокшин В. В., Кирпичников А. П. Многоклассовое обнаружение и отслеживание транспортных средств в видеопоследовательности // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17, № 19. С. 348–355.
6. Сайфудинов И. Р., Мокшин В. В., Кирпичников А. П. Группирование контуров объектов структурных изображений на основе сети заметности элементов // Вестник технологического университета. 2017. Т. 20, № 9. С. 120–123.
7. The comparison of structured modeling and simulation modeling of queueing systems / Yakimov I. [et al.]. DOI: 10.1007/978-3-319-68069-9_21 // Communications in Computer and Information Science (CCIS). 2017.. P. 256–257.
8. Моисеев В. С., Тутубалин П. И. Вероятностная динамическая модель функционирования программных средств активной защиты мобильных распределенных АСУ // Информационные технологии. 2013. № 6. С. 37–42.
9. Тутубалин П. И. Основные задачи прикладной теории информационной безопасности АСУ // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2007. № 39. С. 63–72.
10. Анализ воздействия лазерного излучения на оптические устройства БПЛА / А. А. Ворганов, Е. В. Котенев, И. А. Курдюмов [и др.] // Международный журнал информационных технологий и энергоэффективности. 2024. Т. 9, № 10 (48). С. 165–173.

РАДИОЭЛЕКТРОННОЕ ПОДАВЛЕНИЕ КАНАЛОВ УПРАВЛЕНИЯ И ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ БПЛА

ВОРОНОЙ Андрей Андреевич, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры «Радиоэлектронные системы»

*Поволжский государственный университет
телекоммуникаций и информатики
443010, Россия, Самара, arminvanburn@yandex.ru*

СЕРЕГИН Николай Анатольевич, аспирант

*Поволжский государственный университет
телекоммуникаций и информатики
443010, Россия, Самара, seregin_nikolay@vk.com*

Аннотация. Вопросы обеспечения устойчивого управления и связи для беспилотных летательных аппаратов, а также защищенности их радиоканалов от помехового воздействия являются предметом глубокого изучения в современной научной литературе. Несмотря на значительный объем накопленных знаний, практическая задача радиоэлектронного подавления (РЭП) каналов «пункт управления – БПЛА» сохраняет свою сложность и актуальность.

Ключевые слова: БПЛА, беспилотный летательный аппарат, радиоэлектронное подавление, телеметрическая информация, помехозащищенность, командная радиолиния управления.

ELECTRONIC SUPPRESSION OF UAV CONTROL AND DATA TRANSMISSION CHANNELS

VORONOI Andrey Andreevich, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of «Radio electronic systems»
*Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics
443010, Russia, Samara, arminvanburn@yandex.ru*

SEREGIN Nikolay Anatolyevich, PhD student
*Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics
443010, Russia, Samara, seregin_nikolay@vk.com*

Abstract. UAV, unmanned aerial vehicle, electronic jamming, telemetry information, immunity to interference, command radio control line.

Keywords: education, Master's, tasks, preparation of masters, two-tier system of education, higher education, economic direction.

ВВЕДЕНИЕ

Современный оперативный ландшафт характеризуется стремительной экспансией беспилотных авиационных систем (БАС), что породило острую необходимость в создании высокоэффективных комплексов их радиоэлектронного подавления для защиты объектов критической инфраструктуры и войсковых группировок. Ядро проблемы противодействия заключается в исключительно сложной, распределенной и адаптивной архитектуре бортовых систем управления и связи современных дронов. Данная архитектура представляет собой не монолитный канал, а совокупность специализированных, часто разнесенных в частотном и пространственном отношении линий, передающих потоки данных с кардинально различающимися характеристиками по типу, объему, степени критичности для миссии и уровню криптографической стойкости.

Таким образом, тактико-техническая задача противодействия, сводящаяся на фундаментальном уровне к классической проблеме РЭП – созданию на входе приемника такого соотношения сигнал-шум, которое делает декодирование информации статистически необеспеченным, – на практике наталкивается на комплекс взаимосвязанных вызовов. Эти вызовы обусловлены необходимостью тотального учета широкого спектра специфических факторов: от применяемых сигнально-кодовых конструкций и категорий передаваемых данных, напрямую влияющих на требуемый уровень достоверности, до пространственных, энергетических и временных параметров постоянно меняющегося радиотракта.

Функционально систему связи БПЛА принято делить на два фундаментальных, разнонаправленных контура, каждый из которых решает свои уникальные задачи:

- **Направление «вверх» (Uplink, командная радиолиния):** канал от стационарного или мобильного пункта управления (ПУ) к бортовому оборудованию БПЛА. Это «артерия управления», по которой транслируются дискретные команды коррекции полетного задания, управления

маневрированием, а также целеуказания для аппаратуры полезной нагрузки (разведки, поражения).

- **Направление «вниз» (Downlink, канал телеметрии и целевой информации):** канал от БПЛА обратно к оператору. Этот поток, в свою очередь, структурно делится на два ключевых компонента:

- **Низкоскоростной поток телеметрической информации (ТМИ):** служебные данные о состоянии основных систем летательного аппарата (топливо, обороты двигателя, курс, высота, крен) и квитанции о приеме и исполнении полученных команд.

- **Высокоскоростной поток целевой информации:** объемные данные, генерируемые подвесными системами наблюдения, например, видео высокого разрешения в реальном времени, данные радиолокационной или радиотехнической разведки.

Важно подчеркнуть, что эти линии связи могут быть развернуты в различных частотных диапазонах (от L и C до Ku и Ka), использовать каскадную ретрансляцию через другие летательные аппараты или спутниковые группировки, а также применять сложные помехоустойчивые сигнально-кодовые конструкции, алгоритмически адаптированные под конкретный тип трафика и условия эфира.

В качестве наиболее уязвимого и, следовательно, приоритетного для нейтрализации элемента системы единогласно признается командная радиолиния управления (КРУ) в направлении «вверх». Ее успешное подавление или нарушение целостности наносит дрону максимальный оперативный ущерб, лишая его возможности получать актуальные указания от оператора. Тем не менее практическая реализация подавления КРУ сопряжена с преодолением ряда нетривиальных технологических барьеров:

1. **Проблема радиоэлектронной разведки (РРТР):** корректное определение текущих параметров КРУ «вверх» (несущая частота, тип модуляции, структура кадра) требует уверенного обнаружения и последующего детального анализа излучений именно ПУ, который, действуя в скрытом режиме, может находиться на оперативно-тактическом удалении (30-50 км и более)

от развернутых средств РЭП. Критически усложняет задачу применение на ПУ остронаправленных антенных систем с узкой диаграммой направленности (порядка $5-10^\circ$) и технологически подавленными боковыми лепестками, что радикально снижает вероятность и эффективность перехвата.

2. Дуплексная организация на разнородных частотах: для специализированных БПЛА военного и специального назначения направления «вверх» и «вниз» зачастую организуются не просто на разных частотах в пределах одного диапазона, а в принципиально различных частотных диапазонах. В результате даже успешный перехват и анализ параметров канала «вниз» (телеметрии) не предоставляет разведке релевантных данных для точного целеуказания средствам РЭП на критически важный канал «вверх».

3. Комплексная помехозащищенность: в современных КРУ применяется многоуровневый, эшелонированный подход к обеспечению устойчивости. Он включает такие методы, как spread spectrum (ШПС) с прямым расширением спектра, псевдослучайную перестройку рабочей частоты (ППРЧ) по сложному закону, аппаратное и временное резервирование каналов, протоколы с многократным дублированием квитируемых команд, использование адаптивных антенных решеток с электронным сканированием и строгое сквозное шифрование трафика.

Однако главной оперативной проблемой, выходящей за рамки чисто технических сложностей, является фундаментальная непредсказуемость последствий успешного подавления. Факт прерывания КРУ отнюдь не гарантирует, что БПЛА полностью прекратит выполнение своей боевой задачи. Напротив, бортовой автопилот, следуя заложенному алгоритму, в подавляющем большинстве случаев осуществляет автоматический переход в один из заранее запрограммированных автономных режимов. Для БПЛА, используемых в разведывательных или ударных целях, этот сценарий по умолчанию чаще всего предписывает продолжение полета по заданному маршруту к цели с активным использованием резервных методов навигации (инерциальные системы, корреляция с рельефом, данные спутниковых систем). Следовательно, подавление КРУ хотя и снижает общую вероятность успеха миссии за счет потери гибкости

управления, отнюдь не гарантирует активации предсказуемых и безопасных режимов, таких как «возврат на базу» или «аварийная посадка». Это является системным, фундаментальным ограничением для любой системы противодействия, построенной исключительно на методологии радиоэлектронного подавления.

Следующей по оперативной значимости целью закономерно является линия передачи данных «вниз», и в особенности – высокоскоростной видеопоток от оптико-электронных или инфракрасных систем. Ключевая особенность этого канала – экстремально большой объем передаваемых данных, требующий выделения значительной полосы пропускания. Высокие скорости передачи и жесткие требования к задержкам часто вынуждают разработчиков идти на компромиссы, сознательно ослабляя или исключая ресурсоемкие алгоритмы сквозного шифрования даже на платформах военного назначения. Помимо этого, объективные сложности с размещением крупногабаритных высоконаправленных антенных систем на компактном корпусе дрона приводят к повсеместному использованию всенаправленных антенн или антенн с широкой диаграммой направленности (60-90°), что объективно облегчает задачи их пеленгации, обнаружения и перехвата. Подавление этого канала напрямую лишает оператора или группы анализа визуальной обратной связи, вынуждая управлять аппаратом или оценивать обстановку исключительно по ограниченному набору телеметрии, что катастрофически снижает оперативную эффективность всей системы. Однако для организации эффективного прицельного подавления и этого канала необходимы актуальные разведданные о местоположении ПУ или ретранслятора, которые могут располагаться на значительном удалении, за пределами радиогоризонта для наземных средств РЭП, особенно при размещении ПУ на возвышенностях или борту других летательных аппаратов.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Проведенный анализ позволяет констатировать, что командная радиоперелиния управления (КРУ) является жизненно важным, системообразующим каналом для любого БПЛА, ответственным за передачу наиболее критичных

для выполнения миссии данных. В их число входят: дискретные команды управления полетом и маневрированием, квитанции об их получении, актуальные полетные задания, навигационные поправки и служебная телеметрия. Эти данные характеризуются относительно небольшим объемом (типовые скорости передачи лежат в диапазоне от 2,4 до 200 кбит/с), но обладают высочайшими требованиями к надежности и обязательности доставки в режиме, максимально приближенном к реальному времени, с минимально возможной задержкой.

Для средних, тяжелых и специализированных БПЛА военного назначения КРУ, как правило, организуется по принципу радиолинии прямой видимости со стационарными, мобильными или воздушными пунктами управления. При работе на больших расстояниях, превышающих прямую видимость, активно привлекаются авиационные или спутниковые ретрансляторы. Легкие и коммерческие БПЛА малого радиуса действия, напротив, в подавляющем большинстве случаев используют упрощенную схему прямого соединения с наземным ПУ в пределах прямой геометрической видимости.

Эффективность подавления как каналов управления, так и каналов передачи данных БПЛА является величиной, производной от сложного комплекса взаимозависимых физических и системных факторов, среди которых доминируют:

- **Реальные условия распространения радиоволн:** на основной трассе «БПЛА – ПУ» и на вторичной, но не менее важной, трассе «станция помех – цель (БПЛА или ПУ)». Учитываются рельеф местности, атмосферные условия, уровень индустриальных помех.
- **Сводный энергетический потенциал системы:** определяющее соотношение эквивалентных мощностей излучения передатчиков связи и передатчиков помех, пороговая чувствительность приемников БПЛА и ПУ, а также взаимное пространственное расположение и удаление всех сторон конфликта.
- **Характеристики антенных систем:** тип, эффективность, диаграммы направленности (ДНА), коэффициент усиления и взаимная пространственная ориентация антенн БПЛА, ПУ и средств РЭП.

- **Применяемые сигнально-кодовые конструкции:** используемая полоса частот, тип и манипуляция модуляции, вид и скорость помехоустойчивого кодирования (сверточные коды, LDPC, Turbo-коды), структура кадра и служебных преамбул.

В современной практике радиоэлектронной борьбы для противодействия радиоприемным БПЛА применяются, главным образом, два крупных класса помеховых воздействий, различающихся по тактике применения и требуемому уровню разведанных:

1. **Заградительные (барражирующие) помехи.** Данная тактика применяется в условиях массированного, группового применения дронов-камикадзе или роевых тактик, а также в ситуациях, когда точные параметры конкретных каналов связи противника остаются не вскрытыми средствами РРТР. Основная цель – создание непреодолимого фона помех во всем предполагаемом рабочем диапазоне частот.

- *Шумовая заградительная помеха:* представляет собой широкополосный шумоподобный сигнал типа «белый шум» или «розовый шум» стабильно высокой мощности, целью которого является перекрытие всего заданного диапазона частот и «затопление» полезных сигналов.

- *Сканирующая узкополосная помеха:* более энергоэффективный вариант, при котором источник генерирует концентрированную узкополосную шумовую или тональную помеху, которая по определенному алгоритму последовательно «пробегаёт» (сканирует) по заданному диапазону частот, подавляя каналы поочередно.

2. **Прицельные (целевые) помехи.** Этот класс воздействий применяется для точечного, избирательного подавления одиночных БПЛА или групп, управляемых по одной КРУ, в случаях, когда параметры рабочего канала были предварительно вскрыты и идентифицированы средствами радио- и радиотехнической разведки (РРТР) с высокой точностью.

- *Шумовая прицельная помеха:* узкополосный шумовой сигнал, по своей полосе и центральной частоте точно соответствующий полосе и несущей частоте целевого канала связи.

- *Гармоническая прицельная помеха*: мощное одночастотное или простомодулированное (например, АМ, ЧМ) колебание, точно настроенное на несущую частоту канала противника.
- *Сканирующая помеха для систем с ШПС/ППРЧ*: специализированный тип помехи, предназначенный для борьбы с системами, использующими перестройку рабочей частоты. Узкополосная помеха адаптивно следует за быстрой псевдослучайной перестройкой частоты целевой системы, пытаясь подавить ее в каждый момент времени.
- *Имитирующая (дезинформирующая) помеха*: наиболее сложный в технической реализации, но и потенциально наиболее эффективный тип помехового воздействия. Здесь помеховый сигнал не только точно соответствует несущей частоте, полосе и структуре полезного сигнала противника, но и целенаправленно имитирует его полезную нагрузку (цифровую огибающую). Целью является не просто нарушение или срыв связи, а активный обман системы – передача на БПЛА заведомо ложных команд или данных, что позволяет в идеальном случае осуществить перехват управления, навязать ложные режимы работы (например, принудительный возврат) или дезориентировать оператора.

ВЫВОДЫ

Проведенное исследование позволяет сформулировать ряд ключевых выводов. Во-первых, эффективность помехового воздействия любого из перечисленных типов может быть кардинально повышена за счет интеграции систем помех с средствами высокоточного пространственного наведения. Если комплекс средств радио- и оптико-электронного мониторинга воздушной обстановки в реальном времени позволяет с достаточной точностью прогнозировать или определять текущую траекторию полета БПЛА, антенная система станции помех может быть точно нацелена (вручную или автоматически) непосредственно на дрон или, что еще эффективнее, на его пункт управления. Это позволяет фокусировать энергию помехи в узком секторе, радикально увеличивая отношение сигнал-шум на входе приемника цели и минимизируя общую излучаемую мощность.

Во-вторых, анализ текущего состояния рынка и эксплуатационной практики показывает, что наибольшее оперативное распространение на сегодняшний день получили относительно простые в реализации, но достаточно эффективные шумовые прицельные помехи. Они позволяют быстро реагировать на угрозы при наличии базовых данных радиоразведки.

В-третьих, взгляд в перспективу однозначно указывает, что именно имитирующие (дезинформирующие) помехи, обеспечивающие не пассивный срыв канала связи, а его активное использование для целей дезинформации и подчинения, считаются наиболее перспективным и эффективным инструментом радиоэлектронной борьбы нового поколения. Их применение особенно актуально против интеллектуальных беспилотных систем, способных к автономной работе. Несмотря на исключительную сложность их технической реализации, требующей глубокого анализа протоколов связи в реальном времени и наличия высокопроизводительных генераторов сигналов, именно они позволяют перехватить стратегическую инициативу, трансформировав средство подавления в инструмент контроля.

Список источников

1. Ловушка для дрона: как вывести из строя беспилотник // Государственная корпорация «Ростех. URL: https://rostec.ru/news/lovushka-dlya-drona-kak-vyvesti-iz-stroya-bespilotnik/?sphrase_id=115590. Дата публикации: 24.04.2019.
2. Бойко А. Системы обнаружения и нейтрализации беспилотников // RoboTrends : [сайт]. URL: <http://robotrends.ru/robopedia/sistemy-obnaruzheniya-i-nyaytralizacii-bespilotnikov>. Дата публикации: 21.10.2019.
3. Какие существуют дроны и на каких частотах они работают? // Podavitel.ru : [сайт]. URL: <http://www.podavitel.ru/na-kakikh-chastotakh-rabotayut-kvadrokoptery-i-drony.html> (дата обращения: 20.11.2025).
4. Кашеев А. А., Кошелев В. И. Оценка эффективности подавления сигналов спутниковых радионавигационных систем преднамеренными помехами // Журнал радиоэлектроники. 2012. № 7. 12 с. URL: <http://jre.cplire.ru/koi/jul12/3/text.pdf> (дата обращения: 20.11.2025).

5. Ананьев А. В., Стафеев М. А., Макеев Е. В. Апробация способа организации связи с использованием беспилотных летательных аппаратов // Труды МАИ. 2019. № 105. С. 14

МОДЕЛИРОВАНИЕ МИНИАТЮРНЫХ ПЛАНАРНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ДЛЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПИТАНИЯ

ВОРОНЦОВ Андрей Михайлович, студент
Омский государственный технический университет
644105, Россия, Омск, amvorontsov@st.omgtu.ru

НАЗРУК Елена Маратовна, доцент
Омский государственный технический университет
644105, Россия, Омск, elmarnaz@mail.ru

ЛУТЧЕНКО Сергей Святославович, доцент
Омский государственный технический университет
644105, Россия, Омск, lut_ss@mail.ru

Аннотация. Суть работы заключается в определении основных параметров посредством компьютерного моделирования планарного трансформатора для преобразователей питания в программном продукте ANSIS 2025. Произведена оценка параметров полученного трансформатора и сравнение данных моделирования с расчетными.

Ключевые слова: планарный трансформатор, преобразователь напряжения, компьютерное моделирование.

SIMULATION OF MINIATURE PLANAR TRANSFORMERS FOR POWER CONVERTERS

VORONTSOV Andrey Mikhailovich, student
Omsk State Technical University
644105, Russia, Omsk, amvorontsov@st.omgtu.ru

NAZARUK Elena Maratovna, Associate Professor
Omsk State Technical University
644105, Russia, Omsk, elmarnaz@mail.ru

LUTCHENKO Sergey Svyatoslavovich, Associate Professor
Omsk State Technical University
644105, Russia, Omsk, lut_ss@mail.ru

Abstract. The essence of the work is to determine the main parameters by means of computer modeling of a planar transformer for power converters in the ANSIS 2025

software product. The parameters of the obtained transformer are assessed and the modeling data are compared with the calculated ones.

Keywords: planar transformer, voltage converter, computer simulation.

ВВЕДЕНИЕ

В рамках данной статьи предлагается методика расчета миниатюрных планарных трансформаторов с высотой до 8 мм, используемых в DC/DC-преобразователях и разделительных токовых системах, также представлена методика расчета [1, 2]. Планарные трансформаторы, в отличие от классических с проводочными обмотками, используют дорожки на многослойной печатной плате (PCB) и ферритовые сердечники, что обеспечивает плотность мощности до 21,5 кВт/л и КПД до 98 % [3]. Статья расширяет тезисы, представленные в работе, описывая проектирование, моделирование, сравнение с классическими аналогами, конструкционные особенности и оценку параметров на основе расчетных и смоделированных данных.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Планарные трансформаторы используют обмотки в виде медных дорожек на 4–8-слойной PCB и ферритовый сердечник высотой 5–8 мм, что обеспечивает компактность для портативной электроники. Высокий КПД (95–98 %) [4] достигается за счет низких паразитных параметров и интерливинга обмоток, который снижает потери на 20–30 %. Работа на высоких частотах (100–700 кГц) позволяет уменьшить размеры, а автоматизированное производство PCB снижает стоимость при серийном производстве. Плоская конструкция улучшает теплопередачу.

Конструкция моделируемого планарного трансформатора включает ферритовый сердечник, многослойную PCB и изоляцию. Используется сердечник E18/PLT18 с эффективной площадью сечения 0,39 см², объемом 0,8 см³ и высотой около 5 мм [5, 6]. Обмотки выполняются на 4–8-слойной PCB с медными дорожками толщиной 35–70 мкм и шириной 1–3 мм. Интерливинг первичных и вторичных обмоток минимизирует паразитную индуктивность. Изоляция

с полиимидными слоями обеспечивает более 3–7 мм и гальваническую развязку до 1500–4000 В по стандартам IEC 60950. Исходные параметры, которые были взяты для расчета: входное напряжение 70 В, выходное 8,2 В (основной) и 8 В (для ИС), частота 120 кГц, рабочий цикл 0,48, мощность 8 Вт, температура окружающей среды 60 °С, допустимый нагрев 35 °С [7].

Предложенная методика расчета включает следующие этапы: выбор сердечника (E18/PLT18, феррит 3C90), определение пиковой индукции ($B_{peak} = 0,16$ Тл для минимизации потерь), расчет числа витков ($N_1 = 22$, $N_2 = 3$), индуктивности ($L_p \approx 774$ мкГн) и потерь (сердечник: 344 мВт, медные: 48 мВт). Моделирование проводилось в Ansys 2025 (Maxwell) для анализа магнитных, электрических и тепловых характеристик. Создавалась 3D-модель с сердечником E18/PLT18 и 4-слойной PCB (22 витка первичной обмотки, 3 витка вторичной). Задавались параметры: феррит 3C90 с пиковой индукцией 0,16 Тл, сопротивление дорожек 0,22 Ом (первичная) и 0,01 Ом (вторичная). Рассчитывались S-параметры для оценки паразитных емкостей, индуктивностей и потерь. Результаты моделирования: индуктивность первичной обмотки 774 мкГн, потери в сердечнике 344 мВт (по формуле Штейнмеца с $C_m = 7,13 \times 10^{-3}$ при 120 кГц), медные потери 8 мВт (первичная, $I_{rms} = 0.19$ А) и 40 мВт (вторичная, $I_{rms} = 2$ А). Общие потери составили 392 мВт, КПД – около 95 %. S-параметры показали отклонение расчетных значений от смоделированных менее чем на 5 %, что подтверждает точность методики [8, 9].

ВЫВОДЫ

В рамках проделанной работы были рассмотрены планарные трансформаторы, предложена методика расчета параметров для проектирования, построена модель и проведено компьютерное моделирование в Ansys 2025.

Список источников

1. Гарганеев А. Г. Функциональные системы летательных аппаратов. Электрическое и электронное оборудование : учебное пособие. Томск : ТПУ, 2016. 240 с. URL: <https://e.lanbook.com/book/107717> (дата обращения:

15.11.2024). Режим доступа: для авториз. пользователей. ISBN 978-5-4387-0705-9.

2. Никифоров И. К. Радиоэлектронная и силовая электронная аппаратура. Электромагнитные компоненты и элементы, электромагнитная совместимость, основы магнитоэлектроники : учебное пособие / под ред. Г. П. Свинцова. Чебоксары : ЧГУ им. И.Н. Ульянова, 2019. 448 с. ISBN 978-5-7677-2900-5.

3. Кондрашов А. С., Ястребов А. С. Технология изготовления электронных модулей на печатных платах : учебное пособие. Санкт-Петербург : СПбГУТ им. М.А. Бонч-Бруевича, 2010. 332 с. ISBN 978-5-89160-062-1.

4. Карнаухов Н. Ф. Электронные устройства мехатронных и робототехнических систем : учебное пособие. Ростов-на-Дону : Донской ГТУ, 2017. 391 с. ISBN 978-5-7890-1406-6.

5. Кулинич А. П. Схемотехника электронных средств (Схемотехника) : учебно-методическое пособие. Москва : ТУСУР, 2012. 43 с.

6. Компьютерная модель импульсных источников вторичного электропитания / Е. Н. Меньшов, И. Вахрулин, А. Сороквашин [и др.] // Вестник Ульяновского государственного технического университета. 2000. № 1. С. 57-58. ISSN 1684-7016.

7. Сравнение топологических решений при разработке импульсных источников питания / А. Д. Гришин, М. М. Беззубцева [и др.] // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2023. № 2 (71). С. 154-160. ISSN 2078-1318.

8. Шпенст В. А., Орел Е. А. Повышение надежности вторичного источника питания постоянного тока за счет резервирования сигналов обратной связи // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Энергетика. 2021. № 5. С. 408-420. ISSN 1029-7448.

9. Методика автоматической генерации систем функциональных блоков, реализующих человеко-машинный интерфейс для автоматизации цифровых подстанций МЭК 61850 / А. С. Войнов, В. Н. Дубинин, В. В. Вяткин, Ч. Янг // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2018. № 1. С. 76-91. ISSN 2072-3059.

ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ БЕСПИЛОТНОЙ БОЕВОЙ СИСТЕМЫ И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ВОЙНЕ

ГАЛЕЕВ Зуфар Забирович, студент

*Уфимский университет науки и технологий
450092, Россия, Уфа, gazuza050603@gmail.com*

ДЕРЯБИН Никита Вячеславович, магистр

*Уфимский университет науки и технологий
450105, Россия, Уфа, derabinn30@gmail.com*

Аннотация. Беспилотные боевые системы развиваются как интегрированные комплексы, включающие беспилотные платформы, полезную нагрузку, системы управления и информационные сети. Тенденции развития в США и России охватывают улучшение восприятия окружающей среды, усиление совместимости и рост автономности. Ключевые режимы боевого применения: распределенный кооперативный бой, роевой интеллектуальный бой и интегрированный системный бой. Беспилотные системы обеспечивают информационное превосходство, точные удары и интеллектуализацию войны.

Ключевые слова: беспилотные боевые системы, автономность, совместимость, роевой бой, информационное превосходство, БПЛА, режимы боевого применения, интеллектуализация войны.

TRENDS IN THE DEVELOPMENT OF UNMANNED COMBAT SYSTEMS AND ITS APPLICATION IN INTELLECTUAL WARFARE

GALEEV Zufar Zabirovich, student

*Ufa University of Science and Technology
450092, Russia, Ufa, gazuza050603@gmail.com*

DERYABIN Nikita Vyacheslavovich, Master's student

*Ufa University of Science and Technology
450105, Russia, Ufa, derabinn30@gmail.com*

Abstract. Unmanned combat systems develop as integrated complexes comprising unmanned platforms, payloads, command and control systems,

and air-space-ground information networks. Development trends in the USA and Russia include improvements in environmental perception, enhanced compatibility, and increasing autonomy. Key combat application modes: distributed cooperative combat, swarm intelligent combat, and integrated system combat. Unmanned systems ensure information superiority, precise strikes, and the intellectualization of warfare.

Keywords: unmanned combat systems, autonomy, compatibility, swarm combat, information superiority, UAV, combat application modes, intellectualization of warfare.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время, как отмечается многими исследователями (Xiong et al. [1], J. C. Shi [2], C. S. Fu et al. [3]), все актуальнее становится проблема развития беспилотных боевых систем в контексте информационных войн и интеллектуализации вооруженных сил. Мы становимся свидетелями глобальной гонки за превосходством в технологиях автономных платформ, где беспилотные системы рассматриваются как ключевой фактор обеспечения информационного доминирования и точных ударов [1, с. 5–8] [2, с. 46–52]. Не секрет, что эффективность современных вооруженных сил во многом определяется интеграцией беспилотных платформ с системами искусственного интеллекта и сетевыми технологиями [3, с. 12–13]. Данное исследование способствует углублению понимания тенденций развития беспилотных систем, их практическому применению в боевых операциях и вкладу в науку о военных технологиях, предлагая анализ зарубежного опыта и перспективных режимов применения.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Беспилотная боевая система – это интегрированная боевая система, состоящая из беспилотных боевых платформ, боевой полезной нагрузки, системы командования и управления и информационной сети воздух-космос-земля. В последнее время на полях информационных войн военные державы не жалеют

усилий для разработки и использования беспилотных боевых систем. С увеличением инвестиций и постепенным совершенствованием технологий появляются другие типы беспилотных боевых платформ, такие как беспилотные транспортные средства наземного базирования (UGV), наземные транспортные средства (USV) и другие.

США рассматривают беспилотные боевые системы как ключевую технологию для обеспечения превосходства на современных полях боя. В 2019 г. Пентагон запросил более 9,6 млрд долларов на развитие беспилотных платформ всех типов. На вооружении США более 7000 БПЛА различных классов – от стратегических до тактических. Широко известны RQ-4, MQ-9, MQ-1C и др. Кроме того, активно развиваются автономные наземные системы – Crusher, Ripsaw, SMSS и другие. Также США имеют большое количество беспилотных надводных и подводных аппаратов, используемых для разведки, поиска мин, картографирования дна и борьбы с подводными угрозами. Программа развития США системна и последовательна. Россия за последние 10 лет резко увеличила темпы развития беспилотных систем. Согласно «Концепции развития военного комплекса до 2025 года», РФ делает ставку на автономность и ИИ. Доля беспилотных систем в вооружении должна превысить 30 % к 2025 году. Россия активно развивает ударные и тяжелые БПЛА – например, «Охотник». В наземном сегменте – платформы «Уран», «Платформа-М», «Волк-2». В подводном – беспилотный аппарат «Посейдон».

Улучшение восприятия окружающей среды: сенсоры – основа возможностей беспилотной системы. Быстро развиваются камеры, ИК-сенсоры, лазеры, радары, а также технологии слияния данных. БПЛА и другие платформы должны видеть дальше, точнее определять цели, работать в сложных условиях и обеспечивать всестороннюю разведку.

Усиление совместимости: современные войны требуют взаимодействия между всеми родами войск. Беспилотные системы должны использовать открытую модульную архитектуру, обеспечивать совместимость и обмен данными между платформами. Это позволит использовать единые нагрузки и стандартизированные системы.

Рост автономности: автономность – одно из ключевых направлений. США в рамках программы Offset Strategy считают автономные системы подрывной технологией будущего. Развитие идет от дистанционного управления к системам с полной автономностью: собственным восприятием, принятием решений и выполнением задач без участия оператора.

Типичные режимы боевого применения:

1. Распределенный кооперативный бой

Это совместные действия множества беспилотных систем, каждая из которых выполняет отдельную функцию: разведку, помехи, принятие решений или удар. Такой подход повышает точность, снижает риски и делает систему более устойчивой.

2. Роевой интеллектуальный бой

Роевые системы используют принципы биологических коллективов – птиц, муравьев, пчел. В рое множество малых платформ работает как единый организм. Уже проведены испытания роев из 100+ БПЛА (США – Perdix, Китай – 119 аппаратов). Рои способны выполнять разведку, атаки, подавление ПВО, проникновение вглубь обороны.

3. Интегрированный системный бой

Несмотря на рост автономности, человек остается в центре управления войной. Наиболее эффективной является интеграция человек-машина и взаимодействие беспилотных и пилотируемых систем. Это позволяет объединить сильные стороны обеих сторон – гибкость человека и стойкость машин.

Интеллектуализация войны делает беспилотные системы ключевым элементом вооруженных сил. Они развиваются в направлении улучшения восприятия, расширения совместимости и роста автономности. Основными режимами применения в будущем станут: распределенный кооперативный бой, роевой бой и интегрированные операции человек-машина.

ВЫВОДЫ

В результате исследования установлено, что беспилотные боевые системы играют центральную роль в современных вооруженных конфликтах,

обеспечивая информационное превосходство и точные удары. Анализ тенденций в США и России показал системный рост автономности, совместимости и восприятия, с примерами платформ и режимов применения. Основные результаты подтверждают, что будущее войн лежит в роевых и кооперативных операциях, интегрирующих человека и машину. Это исследование вносит вклад в понимание интеллектуализации войны и может служить основой для дальнейших разработок в области военных технологий.

Список источников

1. X. Hou, J. Wang, J. Du, C. Jiang and Y. Ren, "Distributed Machine Learning for Autonomous Agent Swarm: A Survey," in IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 28, pp. 1597-1636, 2026, doi: 10.1109/COMST.2025.3594713.
2. P. Cao et al., "Computational Intelligence Algorithms for UAV Swarm Networking and Collaboration: A Comprehensive Survey and Future Directions," in IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 26, no. 4, pp. 2684-2728, Fourthquarter 2024, doi: 10.1109/COMST.2024.3395358.
3. H. Khelifi et al., "Named Data Networking in Vehicular Ad Hoc Networks: State-of-the-Art and Challenges," in IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 22, no. 1, pp. 320-351, Firstquarter 2020, doi: 10.1109/COMST.2019.2894816
4. S. Aslam, M. P. Michaelides and H. Herodotou, "Internet of Ships: A Survey on Architectures, Emerging Applications, and Challenges," in IEEE Internet of Things Journal, vol. 7, no. 10, pp. 9714-9727, Oct. 2020, doi: 10.1109/IIOT.2020.2993411.
5. B. Xin, J. Zhang, J. Chen, Q. Wang and Y. Qu, "Overview of Research on Transformation of Multi-AUV Formations," in Complex System Modeling and Simulation, vol. 1, no. 1, pp. 1-14, March 2021, doi: 10.23919/CSMS.2021.0003.
6. L. Paull, S. Saeedi, M. Seto and H. Li, "AUV Navigation and Localization: A Review," in IEEE Journal of Oceanic Engineering, vol. 39, no. 1, pp. 131-149, Jan. 2014, doi: 10.1109/JOE.2013.2278891.
7. J. Gu, T. Su, Q. Wang, X. Du and M. Guizani, "Multiple Moving Targets Surveillance Based on a Cooperative Network for Multi-UAV," in IEEE

Communications Magazine, vol. 56, no. 4, pp. 82-89, April 2018, doi: 10.1109/MCOM.2018.1700422

8. A. Caillot, S. Ouerghi, P. Vasseur, R. Boutteau and Y. Dupuis, "Survey on Cooperative Perception in an Automotive Context," in IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol. 23, no. 9, pp. 14204-14223, Sept. 2022, doi: 10.1109/TITS.2022.3153815..

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ПОДХОДОВ К УПРАВЛЕНИЮ БПЛА В УСЛОВИЯХ ИНДУСТРИАЛЬНЫХ ПОМЕХ

ГАЛЕЕВ Рамиль Наильевич, аспирант

Казанский национальный исследовательский технический университет

им. А. Н. Туполева – КАИ

420111, Россия, Казань, ez4ramus@gmail.com

Аннотация. В данной работе рассматриваются современные подходы к управлению БПЛА в условиях промышленных помех. Определена сущность актуальной проблемы управления БПЛА в сложной электромагнитной обстановке. Выявлены возможные области приложения рассмотренных подходов. Проведен анализ известных подходов, найденных из открытых источников. Дана обобщающая характеристика рассмотренным подходам.

Ключевые слова: БПЛА, промышленные помехи, электромагнитная обстановка, электромагнитная совместимость, управление, ретранслятор, сигнал.

ANALYSIS OF MODERN METHODS OF UAV CONTROLLING IN THE AREA OF INDUSTRIAL INTERFERENCE ISSUE

GALEEV Ramil Nailevich, PhD student

Kazan National Research Technical University n.a. A. N. Tupolev – KAI

420111, Russia, Kazan, ez4ramus@gmail.com

Abstract. The issue of UAV control methods in the air interference were examined. Actual problem of UAV control in difficult electromagnetic situation exist was determined. Possible apply ways for reviewed methods were given. Known methods from open-sources were analyzed. Characteristics were given to each reviewed method.

Keywords: UAV, industrial interference, electromagnetic situation, electromagnetic compatibility, operation, repeater device, signal.

ВВЕДЕНИЕ

Промышленные помехи, появившиеся как проблема проектирования технических средств в середине 20 века, стали основой такой дисциплины,

как электромагнитная совместимость технических средств. Вследствие этого возникает необходимость в разработке различных подходов к уменьшению влияния помех на работоспособность каналов связи беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и средств их управления [1]. Современные подходы учитывают различные сценарии эксплуатации летной техники, в том числе беспилотной, с учетом ландшафта местности, изменения погодных условий, расположения источников помех [2–4]. Для этого оказываются эффективными применение аппаратных и программных подходов управления БПЛА в условиях неблагоприятной электромагнитной обстановки. Разработка подходов для управления БПЛА в условиях помех может представлять научную значимость, применительно к теории автоматического управления, развитию систем навигации и вопросам оптимального использования радиочастотного ресурса конкретной электромагнитной обстановки.

Актуальными на текущее время являются следующие подходы к управлению БПЛА в условиях промышленных помех:

- 1) автономное управление на основе заданного полетного задания;
- 2) автономное управление в условиях изменяющейся обстановки;
- 3) динамический диапазон частот канала управления;
- 4) корректировка движений БПЛА с помощью БПЛА-наблюдателя на удалении от источника помех;
- 5) ретрансляция сигнала управления с помощью другого БПЛА;
- 6) применение помехоустойчивых каналов связи;
- 7) увеличение мощности передатчика.

Перечисленные современные подходы, представленные российскими авторами, являются совокупностью аппаратно-программных улучшений качества связи для управления БПЛА, обеспечивающие приемлемые возможности в условиях промышленных помех, с учетом текущей сложной электромагнитной обстановки в мире [5, 6].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Изученные литературные источники, найденные в открытом доступе, позволили получить обобщенное представление о существующих подходах

к управлению БПЛА в условиях промышленных помех. В качестве примера рассмотрим несколько их наиболее эффективных подходов из публикаций.

1. В статье «Автоматизированная посадка беспилотного летательного аппарата на подвижную платформу с использованием нейронных сетей» В. А. Суслова, С. В. Гагарского рассмотрен подход для управления БПЛА во время посадки с помощью нейронных сетей [7].

2. В статье «Алгоритм управления полетом БПЛА вдоль железной дороги с помощью технического зрения» А. О. Лебедева, В. В. Васильева, А. Г. Паулиш рассмотрен подход к управлению БПЛА без использования навигационных систем GPS и ГЛОНАСС [8].

3. В статье «Использование беспилотных летательных аппаратов в качестве ретрансляторов радиосигнала при проведении радиотелеметрических измерений» С. М. Бердникова, А. Н. Гончарук, В. В. Барагузиной рассмотрен подход к использованию БПЛА в качестве ретранслятора для другого БПЛА [9].

4. В статье «Обоснование эффективности использования сигналов с ортогональным частотным разделением каналов в авиационных радиосистемах передачи информации» Е. А. Буренко рассматривается применение сигналов с ортогональным частотным разделением каналов с подтверждением помехоустойчивости связи [10].

Рассмотренные подходы отличаются сложностью технического исполнения и условиями применения. Каждый подход представляет собой решение актуальной технической задачи, относящейся к распространенным случаям воздействия промышленных помех на приемник помех в виде БПЛА. Авторы рассмотренных публикаций отмечают, что проблема влияния промышленных помех на БПЛА является комплексной и требует всестороннего изучения. Для этого предлагаются методы математического моделирования, натурных испытаний с использованием измерительной аппаратуры и испытаний в условиях приближенных к реальным условиям эксплуатации БПЛА.

ВЫВОДЫ

В результате проведенного анализа были найдены и изучены публикации российских авторов, занимающихся разработками и исследованиями в области БПЛА. Были выявлены и систематизированы современные подходы к управлению БПЛА в условиях промышленных помех. Дана характеристика рассмотренным подходам.

Список источников

1. Антипин Б. М., Виноградов Е. М., Туманова Е. И. Оценка влияния непреднамеренных помех на линию вверх канала управления беспилотного летательного аппарата // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. 2023. № 4 (61). С. 18–33.
2. Ноева А. А. Повышение эффективности грузовых авиаперевозок в труднодоступных регионах РФ с использованием беспилотных летательных аппаратов // Символ науки: международный научный журнал. 2022. № 4-1. С. 44–52.
3. Бубнов А. Г., Сараев И. В., Семенов А. Д. Аспекты надежности и выбора беспилотных летательных аппаратов для предупреждения и мониторинга пожаров в условиях пониженных температур // Современные проблемы гражданской защиты. 2025. № 1 (54). С. 12–26.
4. Захаренков Я. Г. Построение траектории полета беспилотного летательного аппарата в условиях помех // Вестник науки. 2024. Т. 3, № 6 (75). С. 1515–1518.
5. Ромащенко М. А., Васильченко Д. В., Аралов А. Ю. Исследование помехоустойчивости канала связи беспилотных летательных аппаратов к шумоподобным помехам // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2024. Т. 20, № 4. С. 89–93.
6. Каштанов В. В., Немтинов В. А. Анализ организации связи с применением беспилотных летательных аппаратов малой дальности // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2022. Т. 28, № 4. С. 606–614.
7. Суслов В. А., Гагарский С. В. Автоматизированная посадка беспилотного летательного аппарата на подвижную платформу с использованием

нейронных сетей // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2024. Т. 25, № 4. С. 413–426.

8. Лебедев А. О., Васильев В. В., Паулиш А. Г. Алгоритм управления полетом БПЛА вдоль железной дороги с помощью технического зрения // Компьютерная оптика. 2025. Т. 49, № 2. С. 320–327.

9. Бердников С. М., Гончарук А. Н., Барагузина В. В. Использование беспилотных летательных аппаратов в качестве ретрансляторов радиосигнала при проведении радиотелеметрических измерений // Военная мысль. 2020. № 11. С. 80–84.

10. Буренко, Е. А. Обоснование эффективности использования сигналов с ортогональным частотным разделением каналов в авиационных радиосистемах передачи информации / Е. А. Буренко // Труды МАИ. 2022. № 127. – DOI 10.34759/trd-2022-127-14. – EDN ODFNEM..

РАЗРАБОТКА АДАПТИВНОГО ВЕБ-САЙТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОВРЕМЕННЫХ FRONTEND-ТЕХНОЛОГИЙ

ГЕРАСИМОВА Анна Андреевна, бакалавр
*Поволжский государственный университет
телекоммуникаций и информатики
443010, Россия, Самара, gerasimovaanna258@gmail.com*

СТЕФАНОВА Ирина Алексеевна, кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Информатика и робототехнические системы»
*Поволжский государственный университет
телекоммуникаций и информатики
443010, Россия, Самара, aistivt@gmail.com*

Аннотация. В статье рассматривается процесс разработки адаптивного веб-сайта с использованием современных frontend-технологий. Проведен анализ актуальности создания адаптивных веб-ресурсов в условиях многоплатформенного доступа к интернет-контенту. Подробно описаны этапы реализации: создание семантической HTML-разметки, применение CSS3 и фреймворка Bootstrap для обеспечения адаптивности, разработка интерактивных элементов на JavaScript. Особое внимание уделено реализации клиентской логики работы с комментариями и системе валидации форм. Результатом работы является полностью функционирующий веб-ресурс, корректно отображающийся на устройствах с различным разрешением экрана.

Ключевые слова: веб-разработка, адаптивный дизайн, frontend, HTML5, CSS3, JavaScript, Bootstrap, пользовательский опыт.

DEVELOPMENT OF AN ADAPTIVE BUSINESS CARD WEBSITE USING MODERN FRONTEND TECHNOLOGIES

GERASIMOVA Anna Andreevna, bachelor
*Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics,
443010, Russia, Samara, gerasimovaanna258@gmail.com*

STEFANOVA Irina Alekseevna, Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor, Associate Professor at the Department

Abstract. The article discusses the process of developing an adaptive business card website using modern frontend technologies. The analysis of the relevance of creating adaptive web resources in the context of multi-platform access to Internet content is carried out. The implementation stages are described in detail: creation of semantic HTML markup, application of CSS3 and Bootstrap framework for ensuring adaptability, development of interactive elements in JavaScript. Special attention is paid to the implementation of client-side comment logic and form validation system. The result of the work is a fully functional web resource that displays correctly on devices with different screen resolutions.

Keywords: web development, responsive design, frontend, HTML5, CSS3, JavaScript, Bootstrap, user experience.

ВВЕДЕНИЕ

Трудно переоценить значение веб-сайтов в современном мире, ведь именно благодаря им люди получили прекрасные условия для обучения, работы и, конечно же, развлечений [1]. Ключевая задача при разработке современного сайта – сделать его максимально привлекательным для пользователей и обеспечить корректное отображение на всех типах устройств.

Проблема адаптивности веб-ресурсов становится особенно актуальной в условиях, когда пользователи обращаются к интернет-контенту с различных устройств – компьютеров, планшетов, смартфонов [2]. Адаптивность – одно из основных требований, предъявляемых к современным сайтам [1]. Ресурс должен хорошо отображаться на экране компьютера, планшета, смартфона, что требует создания адаптивного дизайна и использования адаптивной верстки.

Целью работы является повышение доступности и удобства восприятия веб-контента за счет реализации адаптивного дизайна и интерактивных клиентских компонентов в рамках разработки сайта-визитки.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Для достижения поставленной цели был выбран современный стек технологий, соответствующий требованиям кроссбраузерности и адаптивности. В качестве основного редактора кода использовался Visual Studio Code, который предоставляет широкие возможности для веб-разработки [3].

Основные технологии, использованные в разработке:

- HTML5 – для разметки;
- CSS3 – адаптивности сайта;
- JavaScript – для реализации интерактивных элементов;
- Bootstrap 5 фреймворк – для ускорения разработки.

Структура сайта была разработана с учетом принципов адаптивного дизайна. Как отмечается в источнике [4], структура сайта – это иерархия информационных блоков, которые ведут пользователя к конкретному целевому действию.

Для начала была написана HTML-разметка как основная часть, к которой в дальнейшем подключаются файлы CSS и JS. Для работы с комментариями был разработан JavaScript-модуль, включающий:

- валидацию вводимых данных;
- динамическое добавление элементов в DOM;
- логику работы с «лайками»;
- локальное хранение данных.

Для повышения пользовательского опыта были реализованы интерактивные элементы с использованием JavaScript. При разработке клиентской логики использовались материалы современного учебника JavaScript [5] и документации MDN [6].

В секции комментариев создана форма отправки сообщений и контейнер для их отображения. Для хранения данных используется массив `comments`, из которого информация выводится с помощью функции `renderComments()`, заменяя статическую HTML-разметку динамической. Блок комментариев состоит из имени, времени, лайка и самого комментария.

Функция «добавить или убрать лайк», внутри которой расположены цикл перебора `for` и обработчик клика `addEventListener`, который закрашивает сердечко стилями «-active-like» или убирает в зависимости от клика.

К кнопке «отправить» прикреплено событие клика, внутри функции реализована проверка на валидность. Метод `push` добавляет новые элементы в массив `comments`.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате разработки был создан полностью функционирующий веб-сайт, соответствующий современным требованиям к веб-разработке. В программе выполняются все необходимые функциональные требования. Отдельные страницы адаптивного веб-сайта приведены на рис. 1, 2.

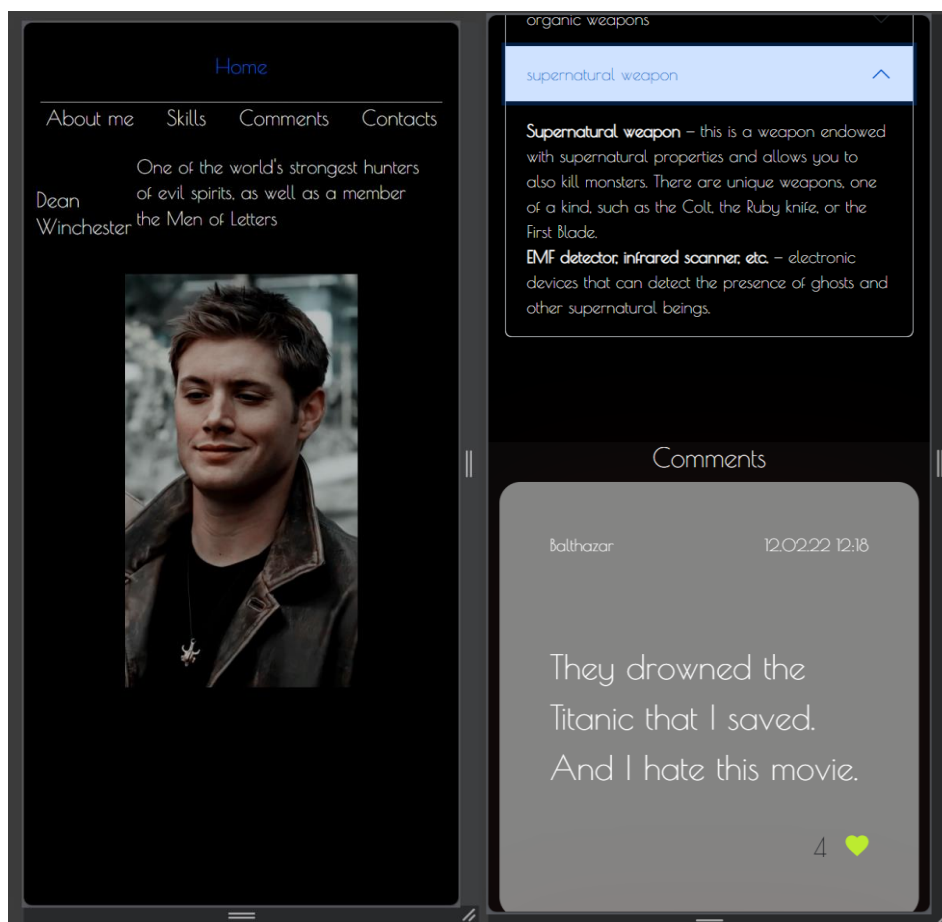


Рис. 1. Страницы адаптивного сайта для мобильного устройства

Минимальное поддерживаемое разрешение экрана для мобильных устройств (рис. 1) составляет 421×854 пикселей. Минимальное разрешение для планшетной и десктопной версии (рис. 2) начинается от 755×84 пикселей.

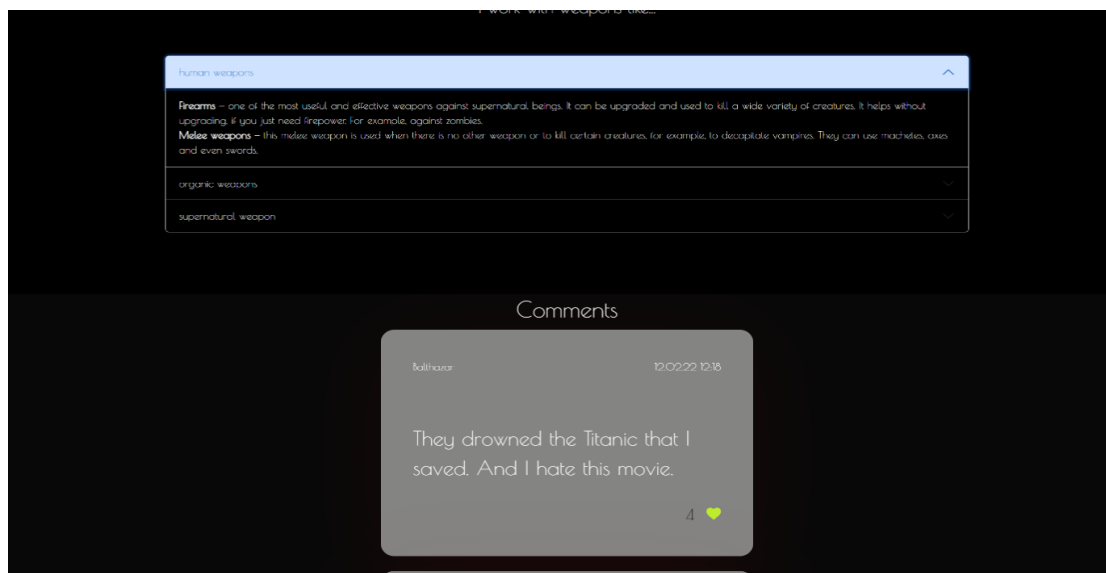


Рис. 2. Страница адаптивного сайта для ноутбука

Проверка корректности отображения осуществлялась на следующих устройствах: Xiaomi Redmi, Apple iPhone, Samsung серий М и А и ноутбуки с использованием режима Toggle Device Toolbar в браузере.

ВЫВОДЫ

Проведенная работа подтвердила эффективность выбранного подхода к созданию адаптивных веб-ресурсов. Это говорит о том, что:

1. Использование современных frontend-технологий позволяет создавать веб-сайты, обеспечивающие оптимальный пользовательский опыт на любых устройствах.
2. Применение CSS-фреймворка Bootstrap значительно ускоряет процесс разработки адаптивных интерфейсов и обеспечивает их стабильность across different browsers.
3. Реализация интерактивных элементов на JavaScript повышает вовлеченность пользователей и улучшает общее восприятие веб-ресурса.

Список источников

1. Роль сайтов в современном мире // Веб-студия СпецСайтСтрой. URL: <http://xn-----6kcbauinlnnyek6bcu9o.xn--p1ai/news-all/rol-sajtov-v-sovremennom-mire-2.html> (дата обращения: 15.11.2024).

2. Что такое лендинг // CXDP : сайт. URL: <https://cxdp.ru/blog/wiki/landing-page> (дата обращения: 15.11.2024).
3. Милин, В. Обзор редакторов кода // HTML Academy : сайт. URL: <https://htmlacademy.ru/blog/soft/editors-for-the-coders> (дата обращения: 15.11.2024).
4. Введение в объекты JavaScript // MDN Web Docs. URL: <https://developer.mozilla.org/ru/docs/Learn/JavaScript/Objects> (дата обращения: 15.11.2024).
5. Современный учебник JavaScript // Learn JavaScript. URL: <https://learn.javascript.ru/> (дата обращения: 15.11.2024).
6. Responsive design // MDN Web Docs. URL: https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Learn/CSS/CSS_layout/Responsive_Design (дата обращения: 15.11.2024).

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ
ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ ММО
СИСТЕМЫ НА ПРОПУСКНУЮ СПОСОБНОСТЬ**

ГОРБАЧЕВ Дмитрий Иванович, студент
*Рязанский государственный радиотехнический
университет им. В. Ф. Уткина
390005, Россия, Рязань, IvanovaAA@rambler.ru*

ПАРШИН Александр Юрьевич, кандидат технических наук,
доцент, доцент кафедры «Радиотехнические устройства»
*Рязанский государственный радиотехнический
университет им. В.Ф. Уткина
390005, Россия, Рязань, parshin.a.y@rsreu.ru*

Аннотация. Современные системы связи должны обеспечивать высокую пропускную способность в различных условиях приема. Одной из задач является обеспечение широкополосного доступа к информации в условиях многолучевого распространения сигналов. Предметом исследования являются многоантенные системы различных конфигураций и расчет их пропускной способности. Решается задача сравнения пропускной способности многоантенных систем.

Ключевые слова: многоантенная система, пропускная способность, матрица канальных коэффициентов, пространственно-временная обработка.

**INVESTIGATION OF SPATIAL
PARAMETERS INFLUENCE ON MIMO SYSTEM CAPACITY**

GORBACHEV Dmitry Ivanovich, student
*Ryazan State Radioengineering University named after V. F. Utkin
390005, Russia, Ryazan, IvanovaAA@rambler.ru*

PARSHIN Alexander Yuryevich, Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor, Associate Professor at the Department
of Radio Engineering Devices
*Ryazan State Radioengineering University named after V. F. Utkin
390005, Russia, Ryazan, parshin.a.y@rsreu.ru*

Abstract. Modern communication systems must provide high capacity in various reception conditions. One of the tasks is to provide broadband access to information in conditions of multipath propagation of signals. The subject of the study is multi-antenna systems of various configurations and the calculation of their capacity. The problem of comparing the capacity of multi-antenna systems is solved.

Keywords: multi-antenna system, capacity, matrix of channel coefficients, space-time processing.

ВВЕДЕНИЕ

Современные требования систем передачи данных по пропускной способности и обеспечению широкополосного доступа привели к развитию многоантенных приемо-передающих систем. Применение пространственного разнесения как на прием, так и на передачу позволяет повысить энергоэффективность канала связи [1]. Характеристики ММО системы связи определяются в том числе расположением отдельных антенн в пространстве. Кроме расстояния между передатчиком и приемником, от которого зависит уровень мощности сигнала на приемнике, на пропускную способность влияют расстояния между элементами антенных систем. При проектировании ММО систем связи выполняется оптимизация пространственных характеристик антенных систем. В работе выполняется оценка пропускной способности для различных пространственных структур антенных систем.

ОПИСАНИЕ АНТЕННЫХ СИСТЕМ

При организации связи в ММО системах предварительно выполняется оценка матрицы канальных коэффициентов $\mathbf{H}$, определяющей распространение сигналов между отдельными антеннами передатчика и приемника. Каждый элемент матрицы в общем случае является комплексным: $h_{mn} = A_{mn} e^{j\varphi_{mn}}$, где m и n – номера элементов антенных систем передатчика и приемника. Множитель A определяет коэффициент передачи амплитуды, а показатель степени экспоненты φ – сдвиг фазы сигнала. Для декодирования сигнала на приемнике должна быть известна оценка матрицы канальных коэффициентов. При этом для повышения

пропускной способности требуется знание матрицы канальных коэффициентов на передатчике. В [2] указаны выражения для пропускной способности при различных конфигурациях антенных систем.

ОПИСАНИЕ КАНАЛА СВЯЗИ

При выполнении исследования рассматривается система ММО, число передающих и приемных антенн которой равно N_{Tx} и N_{Rx} соответственно. Матрица канальных коэффициентов $\mathbf{H}$ имеет размерность $N_{Tx} \times N_{Rx}$, а для конфигурации с одной передающей или одной приемной антенны вырождается в вектор-строку или вектор-столбец. Компонент h_{ij} является комплексным коэффициентом передачи канала между j -й передающей антенной и i -й приемной антенной. Положим мощность сигнала на приемнике равную мощности E_s передаваемого сигнала. Таким образом, матрица канальных коэффициентов рассматривается в нормированном виде, а реальное затухание сигнала при распространении не учитывается.

Элементы матрицы канальных коэффициентов будем считать случайными нормально распределенными величинами h_{ij} [2]. Вектор отсчетов сигнала на входе приемника с учетом матрицы канальных коэффициентов имеет вид [2, 3]:

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{s} + \mathbf{n},$$

где $\mathbf{n}$ – комплексный случайный гауссовский вектор шумов наблюдения.

Каждая компонента шума наблюдения имеет дисперсию $2\sigma_n^2$, одинаковую для всех элементов приемной антенной системы. Определим выражение для отношения сигнал/шум:

$$q = \frac{E_s}{2\sigma_n^2}.$$

Рассмотрим систему связи ММО для случая, когда матрица канальных коэффициентов $\mathbf{H}$ неизвестна на передающей стороне. В этом случае компоненты сигнального вектора $\mathbf{s}$ некоррелированы между собой. Следовательно, сигналы, излучаемые разными передающими антеннами, некоррелированы между собой,

а их мощности одинаковы. Алгоритмы распределения мощности сигнала между отдельными элементами передающей антенной системы не применяются. Выражение для пропускной способности канала MIMO в этом случае принимает вид [2]:

$$C = \log_2 \det \left(\mathbf{1} + \frac{E_s}{N \cdot 2\sigma_n^2} \mathbf{H}\mathbf{H}' \right).$$

Для случая одного элемента передающей антенной системы (SIMO), $N = 1$. Матрица канальных коэффициентов $\mathbf{H}$ представляет собой M -мерный вектор-столбец $\mathbf{H} = [h_1 \ h_2 \ \dots \ h_M]^T$. Выражение для пропускной способности канала связи SIMO имеет вид [2]:

$$C = \log_2 \det \left(1 + \frac{E_s}{2\sigma_\eta^2} \mathbf{H}\mathbf{H}' \right).$$

Для случая MISO, когда имеется только одна приемная антенна, $M = 1$, матрица канала связи $\mathbf{H}$ представляет собой N -мерную вектор-строку $\mathbf{H} = [h_1 \ h_2 \ \dots \ h_N]$. Выражение для пропускной способности канала связи MISO имеет вид:

$$C = \log_2 \det \left(1 + \frac{E_s}{2N\sigma_\eta^2} \mathbf{H}\mathbf{H}' \right).$$

РЕЗУЛЬТАТЫ

Оценка пропускной способности канала связи выполнена методом математического моделирования в среде MatLab. Результаты вычислений усредняются по реализациям $N_{op} = 100$. Формирование матрицы канальных коэффициентов выполняется с использованием последовательности случайных нормально распределенных величин.

По итогам анализа результатов моделирования и расчета пропускной способности многоантенных систем связи показано преимущество использования MIMO конфигурации. Зависимости от числа приемных антенн (рис. 1) показывают, что увеличение числа антенных элементов приемной системы приводит к росту пропускной способности за счет роста отношения сигнал-шум,

т. к. энергия принимаемого сигнала увеличивается пропорционально числу антенных элементов. В свою очередь увеличение числа антенных элементов передающей системы не приводит к значительному росту пропускной способности (рис. 2), т. к. энергия передаваемого сигнала распределяется между отдельными элементами системы. В конфигурации MISO прием осуществляется на единственный элемент антенной системы, поэтому мощность сигнала сохраняется постоянной.

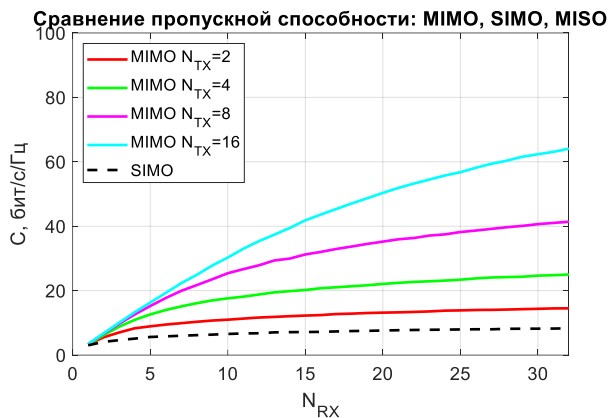


Рис. 1. Сравнение пропускной способности: MIMO, SIMO, MISO

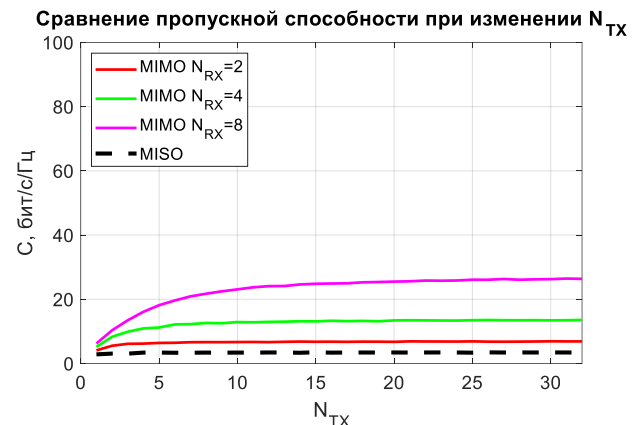


Рис. 2. Сравнение пропускной способности при изменении N_{TX}

Отметим, что пропускная способность канала связи MIMO растет пропорционально числу антенн, в то время как пропускная способность каналов связи SIMO и MISO растет лишь пропорционально логарифму числа антенн (рис. 3). Это означает, что только системы связи с MIMO позволяют достичь весьма высокой спектральной эффективности, а возможности в этом плане систем связи с SIMO или MISO являются весьма ограниченными.

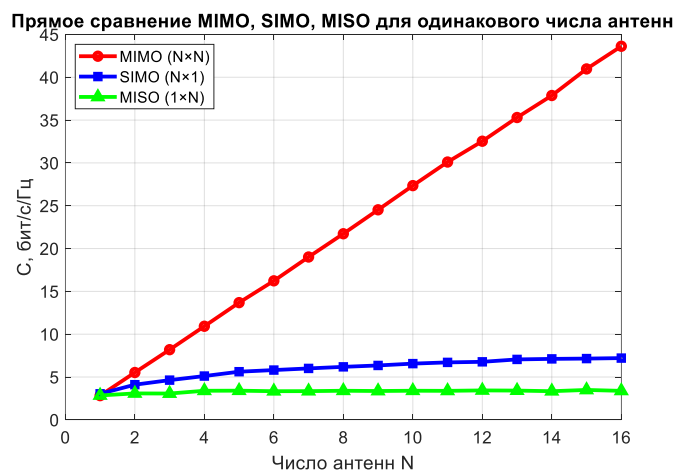


Рис. 3. Прямое сравнение MIMO, SIMO, MISO для одинакового числа антенн

ВЫВОДЫ

Применение многоантенных систем в системах связи является перспективным методом обеспечения высокоскоростного широкополосного доступа к информации. При этом пропускная способность в большей степени зависит от числа приемных антенн, т. к. обеспечивается увеличение энергии принимаемого сигнала.

Список источников

1. Паршин Ю. Н. Пространственно-временная обработка сигналов и компенсация помех : учеб. пособие. Москва : КУРС, 2022. 201 с.
2. Бакулин М. Г., Варукина Л. А., Крейнделин В. Б. Технология ММО: принципы и алгоритмы. Москва : Горячая линия-Телеком, 2014. 244 с. ISBN 978-5-9912-0457-6.
3. Пространственная обработка сигналов в ММО-системах сотовой связи: учебное пособие / В. Т. Ермолаев, А. Г. Флакман, А. В. Елохин, И. С. Сорокин. Нижний Новгород : ННГУ им. Н. И. Лобачевского, 2020. 134 с.
4. Ricean K-Factors in Narrow-Band Fixed Wireless Channels: Theory, Experiments, and Statistical Models / L. J. Greenstein, S. Ghassemzadeh, V. Erceg, D. G. Michelson. DOI:10.1109/TVT.2009.2018549 // IEEE Transactions on vehicular technology. 2006. Vol. 58(8). P. 4000–4012.

**ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ МУЛЬТИМОДУЛЬНАЯ
СИСТЕМА ПРЕДОБРАБОТКИ ТЕКСТА ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ
КАЧЕСТВА РУССКОЯЗЫЧНОГО СИНТЕЗА РЕЧИ**

ГУСАРОВ Максим Евгеньевич, специалист
департамента разработки технологий анализа данных
ООО «Открытый код»
443001, Россия, Самара, *ya.maxim-gusarov@yandex.ru*

ДУСЕНБАЕВ Амиржан Эдуардович, специалист
департамента разработки технологий анализа данных
ООО «Открытый код»
443001, Россия, Самара, *dusenbaev101@gmail.com*

ФЕДУЛОВ Александр Михайлович, специалист
департамента разработки технологий анализа данных
ООО «Открытый код»
443001, Россия, Самара, *sanofedulov2002@mail.ru*

ЛЬВОВ Иван Вячеславович, специалист
департамента разработки технологий анализа данных
ООО «Открытый код»
443001, Россия, Самара, *lvoff2002@mail.ru*

МАРДГАЛИМОВ Ильдар Раильевич, специалист
департамента разработки технологий анализа данных
ООО «Открытый код»
443001, Россия, Самара, *silwercold@gmail.com*

Аннотация. Работа посвящена исследованию методов лингвистической предобработки текста для повышения качества синтеза русской речи. Рассматривается архитектура мультимодульной системы, включающей морфологический анализ, нормализацию числовых выражений, постановку ударений и синтаксическую сегментацию текста перед акустическим генеративным синтезом. Показано, что применение комплексных лингвистических преобразований позволяет существенно улучшить разборчивость и естественность речи в нейросетевых TTS-моделях.

Ключевые слова: синтез речи, NLP, нормализация текста, постановка ударений, лингвистическая предобработка, TTS-системы.

INTELLIGENT MULTI-MODULE TEXT PREPROCESSING SYSTEM FOR IMPROVING THE QUALITY OF RUSSIAN SPEECH SYNTHESIS

GUSAROV Maxim Evgenevich, Specialist
Department of Data Analysis Technology Development
Open Code
443001, Russia, Samara, ya.maxim-gusarov@yandex.ru

DUSENBAEV Amirzhan Eduardovich, Specialist
Department of Data Analysis Technology Development
Open Code
443001, Russia, Samara, dusenbaev101@gmail.com

FEDULOV Alexander Mikhailovich, Specialist
Department of Data Analysis Technology Development
Open Code
443001, Russia, Samara, sanofedulov2002@mail.ru

LVOV Ivan Vyacheslavovich, Specialist
Department of Data Analysis Technology Development
Open Code
443001, Russia, Samara, lvoff2002@mail.ru

MARDGALIMOV Ildar Railevich, Specialist
Department of Data Analysis Technology Development
Open Code
443001, Russia, Samara, silwercold@gmail.com

Abstract. This work examines a set of linguistic preprocessing techniques designed to enhance the output quality of Russian text-to-speech systems. The paper presents a multimodule architecture that integrates morphological analysis, number and abbreviation normalization, stress assignment, and syntactic segmentation prior to the neural acoustic synthesis stage. The results demonstrate that advanced text preprocessing significantly increases naturalness and intelligibility in modern TTS models.

Keywords: text-to-speech, text preprocessing, NLP, stress assignment, linguistic normalization, speech technologies.

ВВЕДЕНИЕ

Сейчас системы синтеза речи часто встречаются в разных цифровых сервисах. Задачи синтеза, создания речи неразрывно связаны с задачами анализа и распознавания [1]. Многие архитектуры для синтеза речи содержат в себе части, обученные на задачах распознавания речи [1]. Но вот с русским языком у них не всегда все гладко, потому что им не хватает понимания текста. Обычно нейросети просто выдают звук, опираясь на статистику символов. Из-за этого они часто ошибаются в произношении чисел, дат, сокращений, неправильно ставят ударения и делают странные интонации.

Чтобы решить эту проблему, можно предварительно обрабатывать текст с помощью лингвистики. Решение задачи синтеза речи (TTS) позволяет автоматизировать очень важные процессы в бизнесе, например, центры звонков, виртуальные консультанты и озвучивание важной информации в общественных местах [2]. Лингвистический анализ помогает правильно преобразовать текст так, чтобы его было проще озвучить [3]. Если нормализовать числа, разобрать слова по составу, определить особенности произношения и восстановить пунктуацию, то звук получается намного лучше.

В этой работе мы хотим посмотреть, насколько полезно использовать такую систему предобработки текста перед синтезом речи. И еще понять, какие именно шаги в этой системе больше всего влияют на то, чтобы речь звучала естественно и понятно.

ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

В этой работе мы создали и изучили систему, которая умеет обрабатывать текст перед тем, как он будет озвучен. Наша цель – сделать так, чтобы синтезированная речь на русском языке звучала лучше. Система состоит из четырех основных шагов, и каждый из них заметно улучшает конечный результат.

1. Предварительная нормализация текста.

На этом этапе мы исправили пунктуацию, расшифровали сокращения и перевели числа и даты в текстовый вид. Это было сделано с помощью Pullenti и разработанными нами модулей `text_tools`. В итоге нормализация чисел

и сокращений уменьшила стандартные ошибки TTS-моделей и увеличила субъективную оценку естественности речи (MOS) на 7 %.

2. Морфосинтаксический анализ.

Используя `rumorphy3` и `sraCy`, мы определяли части речи, приводили слова к начальной форме, выделяли грамматические признаки и исследовали связи между словами в предложениях. Это позволило лучше понять структуру предложений, выявить границы смысловых частей и уточнить контекст употребления многозначных слов. Такой углубленный анализ структуры фраз помог уменьшить ошибки в интонации, улучшить согласованность речи и точнее выбирать места для пауз.

3. Расстановка ударений.

Для правильной расстановки ударений мы применили библиотеку `ruAccent` и разработали собственные правила, учитывающие значения слов, их формы и контекст. Это позволило сократить количество ошибок в произношении, связанных с изменением ударения в зависимости от употребления слова. В результате этот подход к расстановке ударений заметно улучшил разборчивость речи, мы зафиксировали снижение количества ошибок (WER) примерно на 15 % и повышение качественной оценки (MOS) на 5 %.

4. Подготовка текста к синтезу.

На заключительном этапе текст разбили на части, добавили логические паузы и подготовили фонетическую структуру. Затем этот текст использовали в моделях `Vosk TTS 0.9` и `VITS` для генерации речи [4]. В итоге благодаря структурированию стало меньше ненужных пауз и речь звучит более плавно.

ВЫВОДЫ

Работа показала, что хорошая подготовка текста крайне важна для качественного синтеза русской речи. Главное:

1. Системы, использующие разные лингвистические модули, стабильно улучшают качество преобразования текста в речь (TTS), делая ее звучание более естественным и правильным.

2. Правильная расстановка ударений и приведение чисел к единому виду очень важны для улучшения оценок MOS и WER, так как это убирает основные ошибки при работе нейросетей.

3. Скрещивание методов обработки естественного языка и нейросетей в синтезе речи сейчас обладает большим потенциалом для создания русских голосовых помощников. Так можно добиться и правильного анализа текста, и естественного звучания.

Список источников

1. Пантюхин Д. В. Нейронные сети синтеза речи голосовых помощников и поющих автоматов // Речевые технологии. 2021. № 3. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50185096> (дата обращения: 14.11.2025). Режим доступа: для зарегистрир. пользователей.

2. Абросимов К. И. Анализ современных нейросетевых моделей синтеза речи // Труды Университета ИТМО. Серия «Информационные технологии». 2022. № 4. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49789004> (дата обращения: 14.11.2025). Режим доступа: для зарегистрир. пользователей.

3. Transformer-based Models of Text Normalization for Speech Applications / Ro J. H. et al. DOI:10.48550/arXiv.2202.00153. // arXiv : сайт. URL: <https://arxiv.org/pdf/2202.00153> (date of request : 14.11.2025).

4. HelloLena. Text-to-Speech. Анализ открытых решений синтеза речи // Хабр : сайт. URL: <https://habr.com/ru/companies/ntechlab/articles/854724/> (дата обращения: 14.11.2025).

**АРХИТЕКТУРА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ПРОГРАММНОГО
КОМПЛЕКСА ДЛЯ ИЗВЛЕЧЕНИЯ И ИДЕНТИФИКАЦИИ
АТТРИБУТОВ ПРОМЫШЛЕННОЙ ПРОДУКЦИИ
ПО ДАННЫМ ОТКРЫТЫХ ИСТОЧНИКОВ**

ДУСЕНБАЕВ Амиржан Эдуардович, специалист
департамента разработки технологий анализа данных
ООО «Открытый код»
443001, Россия, Самара, dusenbaev101@gmail.com

ФЕДУЛОВ Александр Михайлович, специалист
департамента разработки технологий анализа данных
ООО «Открытый код»
443001, Россия, Самара, sanofedulov2002@mail.ru

ГУСАРОВ Максим Евгеньевич, специалист
департамента разработки технологий анализа данных
ООО «Открытый код»
443001, Россия, Самара, ya.maxim-gusarov@yandex.ru

ЛВОВ Иван Вячеславович, специалист
департамента разработки технологий анализа данных
ООО «Открытый код»
443001, Россия, Самара, lvoff2002@mail.ru

МАРДГАЛИМОВ Ильдар Раильевич, специалист
департамента разработки технологий анализа данных
ООО «Открытый код»
443001, Россия, Самара, silwercold@gmail.com

Аннотация. В работе представлена архитектура интеллектуального программного комплекса для автоматизированного извлечения и идентификации атрибутов промышленной продукции по данным открытых веб-источников. Комплекс ориентирован на обработку HTML-страниц сайтов производителей и маркетплейсов, преобразование их в очищенный текст и последующее извлечение характеристик на основе моделей распознавания именованных сущностей. Предложена модульная конвейерная архитектура, включающая подсистемы веб-сбора, парсинга, NER-извлечения, нормализации, хранения и API-доступа к результатам. Подчеркнуты преимущества архитектуры: устойчивость

к изменениям структуры сайтов, масштабируемость и пригодность к интеграции в промышленные информационные системы.

Ключевые слова: промышленная продукция, атрибуты, открытые источники, веб-скрейпинг, HTML-страницы, извлечение информации, NER, обработка естественного языка, модульная архитектура.

ARCHITECTURE OF AN INTELLIGENT SOFTWARE COMPLEX FOR EXTRACTING AND IDENTIFYING INDUSTRIAL PRODUCT ATTRIBUTES FROM OPEN SOURCES

DUSENBAEV Amirzhan Eduardovich, Specialist
Department of Data Analysis Technology Development
Open Code
443001, Russia, Samara, dusenbaev101@gmail.com

FEDULOV Alexander Mikhailovich, Specialist
Department of Data Analysis Technology Development
Open Code
443001, Russia, Samara, sanofedulov2002@mail.ru

GUSAROV Maxim Evgenevich, Specialist
Department of Data Analysis Technology Development
Open Code
443001, Russia, Samara, ya.maxim-gusarov@yandex.ru

LVOV Ivan Vyacheslavovich, Specialist
Department of Data Analysis Technology Development
Open Code
443001, Russia, Samara, lvoff2002@mail.ru

MARDGALIMOV Ildar Railevich, Specialist
Department of Data Analysis Technology Development
Open Code
443001, Russia, Samara, silwercold@gmail.com

Abstract. The paper proposes an architecture of an intelligent software complex for automatic extraction and identification of industrial product attributes from open web sources. The complex processes HTML pages from manufacturers' websites and marketplaces, converts them into cleaned text, and extracts attributes using named entity recognition models. A modular pipeline architecture is introduced, comprising

web crawling, text parsing, NER-based extraction, normalization, storage, and an API layer. The advantages of the architecture are discussed, including robustness to web-page layout changes, scalability, and suitability for integration into industrial information systems.

Keywords: industrial products, attributes, open sources, web scraping, HTML pages, information extraction, NER, natural language processing, modular architecture.

ВВЕДЕНИЕ

Структурированные сведения об атрибутах промышленной продукции (технические параметры, материалы, режимы эксплуатации, габариты, стандарты соответствия и др.) необходимы для задач поиска, сравнения, формирования каталогов, поддержки закупочной и конструкторской деятельности. На практике значительная часть таких данных доступна только в открытом доступе: на сайтах производителей, отраслевых каталогах и маркетплейсах. Эти источники представляют информацию в виде HTML-страниц, где характеристики могут быть включены в таблицы, списки или связное текстовое описание.

Традиционные решения для веб-извлечения опираются на правила парсинга DOM-структуры (XPath/CSS-селекторы). При росте числа источников и ассортимента такой подход плохо масштабируется, а малейшие изменения разметки приводят к потере работоспособности и необходимости постоянных ручных доработок. В связи с этим актуальной является разработка интеллектуального комплекса, который извлекает атрибуты, опираясь на семантику текста и устойчивые лингвистические паттерны, а не на фиксированные элементы HTML. Современные нейросетевые методы NER и веб-экстракции демонстрируют высокую переносимость между сайтами и предметными областями, что подтверждается результатами недавних исследований [1–3].

Цель работы – разработка архитектуры интеллектуального программного комплекса для извлечения и идентификации атрибутов промышленной продукции по данным открытых веб-источников. Для достижения цели решаются задачи: проектирование модульной архитектуры, выбор методов веб-сбора

и очистки текста, реализация извлечения атрибутов на базе NER, разработка процедур нормализации и идентификации, организация хранения и API-доступа к результатам.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Предлагаемый комплекс имеет конвейерную модульную архитектуру (pipeline), обеспечивающую независимость компонентов и удобство масштабирования. Обработка данных включает следующие этапы.

Сбор HTML-страниц. Модуль веб-сбора реализует краулинг страниц производителей и маркетплейсов. Он выполняет асинхронную загрузку URL, фильтрует нерелевантные страницы по шаблонам ссылок и ключевым признакам (наличие разделов характеристик), допускает подключение headless-браузера для динамического контента [4–5].

Очистка и парсинг текста. Загруженный HTML преобразуется в текст: удаляются скрипты, стили и навигационные блоки, выполняется выделение продуктовых описаний и таблиц характеристик. Табличные пары «параметр–значение» извлекаются напрямую; связные описания разбиваются на предложения и токены для последующего семантического анализа [6].

Извлечение атрибутов (NER). Центральный модуль комплекса применяет нейросетевую модель распознавания именованных сущностей, обученную на корпусе технических русскоязычных текстов. Модель выявляет значения атрибутов и их контекстные маркеры (например, числовые параметры с единицами измерения), что позволяет обрабатывать тексты разных сайтов без настройки правил под каждый источник. Подход соответствует современным работам по переносимому извлечению атрибутов из веб-документов [1, 2].

Нормализация и идентификация. Извлеченные сущности приводятся к единому виду: названия атрибутов унифицируются по словарю синонимов и семантическому сходству; числовые значения переводятся в стандартные единицы; устраняются дубли и конфликтующие значения. Атрибуты связываются с объектом «продукт», идентифицируемым по URL, артикулу или названию модели [7–9].

Хранение и API-доступ. Нормализованные данные сохраняются в БД (реляционной или документо-ориентированной). API-слой предоставляет методы получения атрибутов по продукту и поиска по значениям характеристик, обеспечивая интеграцию комплекса в корпоративные каталоги и аналитические системы.

Модульная архитектура позволяет независимо развивать компоненты: обновлять NER-модель, расширять парсер под новые типы источников, масштабировать узкие места вычислений. В отличие от правил –ориентированных скриптов, комплекс сохраняет работоспособность при изменении HTML-структуры, поскольку извлечение опирается на смысловые элементы текстов [10].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Разработан прототип комплекса и проверен на выборке HTML-страниц сайтов производителей и маркетплейсов промышленной продукции. Экспериментальная проверка показала, что система корректно извлекает числовые и категориальные характеристики (например, мощность, напряжение, масса, материал, степень защиты), представленные как в таблицах спецификаций, так и в связных описаниях. Нормализация обеспечила единообразие единиц измерения и наименований атрибутов, что упростило последующее хранение и поиск.

Полученные результаты подтверждают практическую применимость предложенной архитектуры для автоматического наполнения и актуализации справочников промышленной продукции.

ВЫВОДЫ

Предложена архитектура интеллектуального программного комплекса для извлечения и идентификации атрибутов промышленной продукции из открытых веб-источников. Ключевые особенности архитектуры: модульность, конвейерная организация обработки, использование NER-моделей для семантического извлечения характеристик и последующая нормализация данных. Архитектура обеспечивает устойчивость

к изменениям структуры сайтов, масштабируемость при росте числа источников и возможность интеграции в промышленные информационные системы через API.

Перспективы развития связаны с расширением типов входных данных (PDF/технические паспорта), добавлением мультимодальных источников (изображения/шильдики) и интеграцией с онтологиями и графовыми БД для более строгой семантической идентификации атрибутов.

Список источников

1. FreeDOM: A Transferable Neural Architecture for Structured Information Extraction on Web Documents / Lin B.Y. et al. DOI:10.1145/3394486.3403153 // 26th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining (KDD'20). 2020. P. 1092–1102.

2. DOM2R-Graph: A Web Attribute Extraction Architecture with Relation-Aware Heterogeneous Graph Transformer / Feng, J. et al. DOI:10.1007/978-3-031-30105-6_39 // Neural Information Processing. ICONIP 2022. Lecture Notes in Computer Science. Vol. 13623. Cham : Springer, 2023. P. 468–479.

3. Gangadhar G. K., Kulkarni A. Extraction of Product Specifications from the Web – Going Beyond Tables and Lists. 9 p. The electronic version. URL: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://arxiv.org/pdf/2201.02896 (date of request: 23.11.2025).

4. AdaTag: Multi-Attribute Value Extraction from Product Profiles with Adaptive Decoding / J.Yan. et al. DOI:10.48550/arXiv.2106.023189. 12 p. The electronic version. URL: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://arxiv.org/pdf/2106.02318 (date of request: 23.11.2025).

5. Generative Models for Product Attribute Extraction / Blume A. et al. DOI:10.18653/v1/2023.emnlp-industry.55 // Proceedings of the 2023 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing: Industry Track. Singapore : Association for Computational Linguistics, 2023. C. 575–585.

6. Large Scale Generative Multimodal Attribute Extraction for E-commerce Attributes / Khandelwal A. et al. DOI:10.18653/v1/2023.emnlp-industry.55. 8 p. The

electronic version. URL: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgglefindmkaj/https://arxiv.org/pdf/2306.00379> (date of request: 23.11.2025).

7. Roy K., Goyal P., Pandey M. Exploring Generative Frameworks for Product Attribute Value Extraction. DOI:10.1016/j.eswa.2023.122850 // Expert Systems with Applications. 2024. Vol. 243.122850. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0957417423033523> (date of request: 23.11.2025).

8. New Large Language Model for Attribute Extraction in E-Commerce Product Categorization / Çiftlikçi M. et al. DOI:10.3390/electronics14101930 // Electronics. 2025. Vol. 14, № 10. 1930.

9. AttriSage: Product Attribute Value Extraction Using Graph Neural Networks / Potta R. et al. DOI:10.18653/v1/2024.eacl-srw.8 // Proceedings of the 18th Conference of the European Chapter of the Association for Computational Linguistics: Student Research Workshop. St. Julian's, Malta : Association for Computational Linguistics, 2024. C. 89–94.

10. Does Named Entity Recognition Truly Not Scale Up to Real-World Product Attribute Extraction? / Chen W.-T. et al. DOI:10.18653/v1/2023.emnlp-industry.16 // Proceedings of the 2023 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing: Industry Track. Singapore : Association for Computational Linguistics, 2023. C. 152–159.

**ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОСЕТЕВЫХ МОДЕЛЕЙ
NER ДЛЯ ИЗВЛЕЧЕНИЯ АТТРИБУТОВ
ПРОМЫШЛЕННОЙ ПРОДУКЦИИ**

ДУСЕНБАЕВ Амиржан Эдуардович, специалист
департамента разработки технологий анализа данных
ООО «Открытый код»
443001, Россия, Самара, *dusenbaev101@gmail.com*

ФЕДУЛОВ Александр Михайлович, специалист
департамента разработки технологий анализа данных
ООО «Открытый код»
443001, Россия, Самара, *sanofedulov2002@mail.ru*

ГУСАРОВ Максим Евгеньевич, специалист
департамента разработки технологий анализа данных
ООО «Открытый код»
443001, Россия, Самара, *ya.maxim-gusarov@yandex.ru*

ЛВОВ Иван Вячеславович, специалист
департамента разработки технологий анализа данных
ООО «Открытый код»
443001, Россия, Самара, *lvoff2002@mail.ru*

МАРДГАЛИМОВ Ильдар Раильевич, специалист
департамента разработки технологий анализа данных
ООО «Открытый код»
443001, Россия, Самара, *silwercold@gmail.com*

Аннотация. Работа направлена на изучение возможностей использования нейронных сетей для выделения признаков промышленных изделий посредством метода распознавания именованных объектов (NER). Исследуются новейшие методы решения задачи NER, а также создание уникальных целевых моделей. Подчеркивается значимость грамотного подбора структуры нейросети и стратегии ее обучения для достижения максимальной точности и стабильности результатов.

Ключевые слова: машинное обучение, извлечение атрибутов, технология NER, промышленная продукция, обучения алгоритмов

APPLICATION OF NER NEURAL NETWORK MODELS TO EXTRACT ATTRIBUTES OF INDUSTRIAL PRODUCTS

DUSENBAEV Amirzhan Eduardovich, Specialist
Department of Data Analysis Technology Development
Open Code
443001, Russia, Samara, dusenbaev101@gmail.com

FEDULOV Alexander Mikhailovich, Specialist
Department of Data Analysis Technology Development
Open Code
443001, Russia, Samara, sanofedulov2002@mail.ru

GUSAROV Maxim Evgenevich Specialist
Department of Data Analysis Technology Development
Open Code
443001, Russia, Samara, ya.maxim-gusarov@yandex.ru

LVOV Ivan Vyacheslavovich, Specialist
Department of Data Analysis Technology Development
Open Code
443001, Russia, Samara, lvoff2002@mail.ru

MARDGALIMOV Ildar Railevich, Specialist
Department of Data Analysis Technology Development
Open Code
443001, Russia, Samara, silwercold@gmail.com

Abstract. This work aims to explore the possibilities of using neural networks to extract features of industrial products using the Named Entity Recognition (NER) method. The paper examines the latest techniques for solving the NER problem and creating unique target models. It emphasizes the importance of selecting the right neural network structure and training strategy to achieve maximum accuracy and stability in the results.

Keywords: machine learning, attribute extraction, NER technology, industrial products, algorithm training.

ВВЕДЕНИЕ

Современные производственные компании ежедневно сталкиваются с необходимостью обработки больших объемов технических документов,

содержащих описания характеристик производимых товаров. Эти документы включают в себя технические характеристики, руководства по применению, свидетельства о соответствии стандартам и прочую значимую информацию. Но часто эта информация предоставляется в формате обычного текста, который сложно эффективно использовать для целей управления предприятием, производственного планирования и маркетингового анализа.

Один из эффективных методов превращения такого неупорядоченного текста в удобную структуру – применение технологии распознавания именованных объектов (NER). Данная методика помогает автоматически выявлять и систематизировать важные детали из документа, такие как названия брендов, наименования моделей, физико-химические параметры, области применения и прочие атрибуты продукта. Структурированная подобным образом информация полезна для создания баз данных, проведения рыночного анализа, формирования стратегии продвижения товара и повышения эффективности производственных операций [1].

Основная задача данной работы заключается в изучении перспектив использования нейронных сетей для извлечения значимых признаков промышленных изделий через технологию NER. Основное внимание уделено вопросам предварительной подготовки исходных данных, выбора оптимальной структуры нейронной сети и оценки точности полученных результатов.

Задача идентификации именованных объектов (NER) заключается в автоматическом выделении определенных участков текста, соответствующих заранее установленным категориям объектов. Типичными категориями являются личные имена, географические названия, названия организаций, даты, суммы денег и другие подобные элементы. Для промышленных приложений значимыми объектами становятся бренды, модели изделий, физические характеристики, назначение товаров и товарные категории [2].

С технической точки зрения NER подразумевает пошаговую обработку текста путем разделения его на отдельные лексемы и присвоение каждой из них меток соответствующего типа объекта. Технологии NER активно используются в приложениях анализа естественного языка (NLP), включая поисковые системы,

виртуальных помощников, системы рекомендаций и инструменты аналитики больших объемов данных [3].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Эксперимент проводился на основе реальных данных, полученных из технических документов и справочников промышленных продуктов. Эти данные были детально аннотированы специалистами, что обеспечило создание качественного набора данных для обучения алгоритмов.

Нейросетевая модель строится на основе RUPunct/RUPunct_big.

Модель RUPunct изначально была создана для восстановления пунктуации, поэтому необходимо ее переобучить.

Для этого используем библиотеку Transformers от Hugging Face, так как она поддерживает широкий спектр моделей для русского языка.

Архитектура модели выглядит следующим образом:

1. Предварительная обработка текста:

- токенизация и лемматизация текста;
- кодировка текстового входа с использованием встроенных механизмов эмбедингов выбранной модели.

2. Экстракция признаков:

- получение векторных представлений каждой последовательности слов с учетом контекста.

3. Классификация сущностей:

- каждая позиция в представлении вектора классифицируется как принадлежащая одному из классов атрибутов или отсутствию атрибута.

4. Оптимизация модели:

- используется механизм Cross Entropy Loss для оптимизации процесса обучения и повышения точности предсказания.

ВЫВОДЫ

Настоящая работа подтвердила эффективность использования нейронных сетей для выделения характеристик промышленной продукции.

Ключевые советы для успешного внедрения методов распознавания именованных сущностей (NER) в промышленную сферу состоят в следующем:

- тщательная подготовка датасетов и скрупулезная проверка аннотаций;
- подбор оптимальной структуры нейросетей в зависимости от требуемого уровня точности и наличия вычислительных мощностей;
- периодическое дообучение и обновление моделей для обеспечения их соответствия актуальным данным.

Перспективными направлениями дальнейших исследований являются разработка комбинированных моделей, объединяющих преимущества разных подходов, а также внедрение продвинутых методик предобработки данных для улучшения качества результатов.

Список источников

1. Введение в нейросети для бизнеса // NeuroWorld : сайт. URL: <https://neuroworld.ru/rabota/neuroseti-dlya-biznesa/> (дата обращения: 13.11.2025).
2. Мельникова А. Нейросети в промышленности: революция технологий производства // Skypro Wiki : образовательный портал. URL: <https://sky.pro/wiki/python/primenenie-nejrosetej-v-promyshlennosti/> (дата обращения: 13.11.2025).
3. Разработка нейронных сетей на базе искусственного интеллекта // HirexTech : сайт компании. URL: <https://hirex.tech/expertise/ai/neuro> (дата обращения: 13.11.2025).
4. Смирнов Е., Бакалец И., Рябоконь Д. Современные подходы к NER // DeepSchool : блог. URL: <https://blog.deepschool.ru/llm/sovremennye-podhody-k-ner/> (дата обращения: 13.11.2025).

НЕКОГЕРЕНТНАЯ ДЕМОДУЛЯЦИЯ СИГНАЛОВ ОРТОГОНАЛЬНОЙ ГИБРИДНОЙ MFSK-DPSK МОДУЛЯЦИИ

ЕЛИСЕЕВ Сергей Николаевич,
профессор, доктор технических наук
Московский технический университет связи и информатики
111024, Россия, Москва, fgupnrsnr@yandex.ru

КУРОЧКИН Григорий Алексеевич, студент
Московский технический университет связи и информатики
111024, Россия, Москва, gkurochkin07@gmail.com

Аннотация. Для модема, работающего по узкополосным радиоканалам, на передачу задействован MFSK модулятор в виде цифрового вычислительного синтезатора (DDS) с дополнительными функциями, реализующими цифровую гибридную модуляцию (ГМ). Приемная часть является некогерентным демодулятором, выполненным по квадратурной схеме. ГМ улучшает использование выделенного частотного ресурса канала. Рассмотрен вариант 4FSK-2DPSK модема, в котором применен метод обмена уменьшения скорости передачи сообщений на увеличение помехоустойчивости при максимальной совместимости с основной схемой MFSK-2DPSK. Определены условия целесообразности перехода на такой режим работы модема.

Ключевые слова: модем, узкополосный радиоканал, некогерентный демодулятор, MFSK модуляция, 4FSK-2DPSK гибридная модуляция, цифровой вычислительный синтезатор (DDS)

NONCOHERENT DEMODULATION OF SIGNALS WITH HYBRIG MFSK-DPSK MODULATION

ELISEEV Sergei Nikolaevich, Professor, Doctor of Engineering Sciences
Moscow Technical University of Communications and Informatics
111024, Russia, Moscow, fgupnrsnr@yandex.ru

KUROCHKIN Grigoriy Alekseevich, student
Moscow Technical University of Communications and Informatics
111024, Russia, Moscow, gkurochkin07@gmail.com

Abstract. For a modem designed for transmitting over narrow-band radio channels, a MFSK modulator is used in the transmitting part, built as a digital computational synthesizer (DDS) with additional features that implement digital hybrid modulation (HM). The receiving side is noncoherent demodulator based on a quadrature scheme. Efficient use of the allocated frequency resource of the channel is ensured through the use of hybrid MFSK-2DPSK modulation. This article discusses a modem option that uses a method to reduce the data transfer rate through signal exchange. This allows you to increase noise immunity and at the same time maintain full compatibility with the main MFSK-2DPSK circuit. The article also defines the conditions under which the transition to this mode of modem operation becomes justified.

Keywords: modem, narrowband radio channel, noncoherent demodulator, MFSK modulation, 4FSK-2DPSK hybrid modulation, digital computational synthesizer(DDS).

ВВЕДЕНИЕ

Применение сигналов OFDM-MFSK для передачи сообщений между M2M устройствами, перспективно при работе по узкополосным каналам на большие расстояния [1]. Некогерентные демодуляторы позволяют получить результат без выполнения процедур оценки канала, усложняющих схемы модемов [2]. Метод ГМ [2] позволяет улучшить показатель спектральной эффективности системы OFDM-MFSK, главный ее недостаток.

СХЕМА МОДЕМА

В данной работе на примере модема с ГМ вида 4FSK-2DPSK, работающего в узкополосных каналах стандартной полосы 12,5 кГц, его структурная схема приведена на рис. 1а,б. Реализация модулятора в передающей части модема в виде цифрового вычислительного DDS генератора [3] позволяет осуществить ГМ компактно в одном узле.

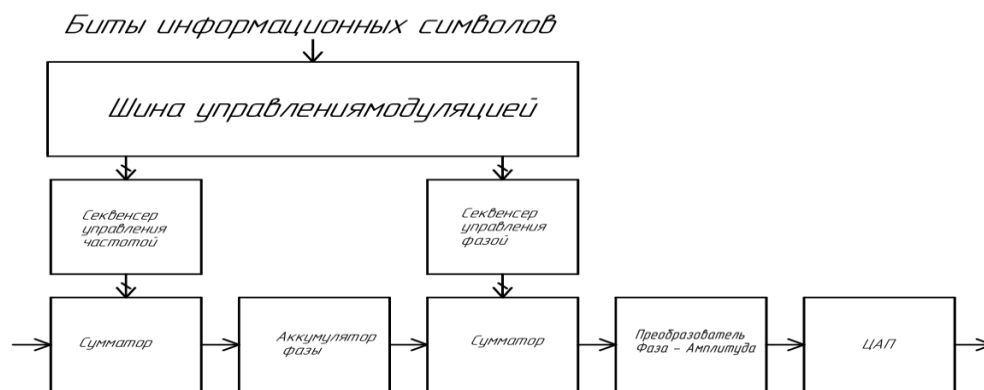


Рис. 1а. Структурная схема

передающей части модема с гибридной модуляцией

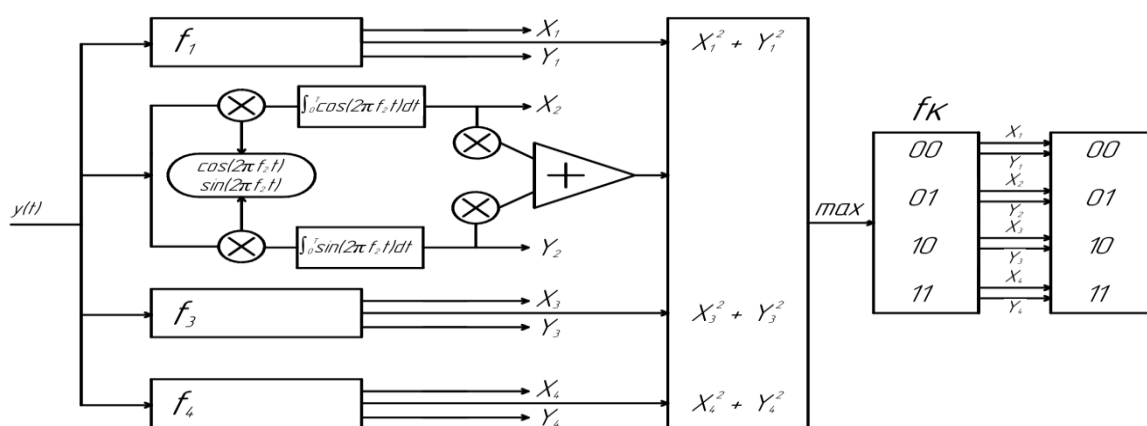


Рис. 1б. Структурная схема

приемной части модема с гибридной модуляцией

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ

Результаты оценки помехоустойчивости модемов 4FSK и 2DPSK(DQPSK) для канала с постоянными параметрами и аддитивным белым гауссовым шумом (АБГШ) и канала с общими медленными релеевскими замираниями неоднократно приводились в литературе, например в [4, 5]. Вероятность ошибки для ГМ при передаче по рассмотренным радиоканалам, определенные, в первом приближении, по формулам полной вероятности в конечном итоге [2] (рис. 2):

$$P_H = P_{Db} + P_{Ms} - P_{Db} \times P_{Ms} < P_{Db} + P_{Ms}; \quad (1)$$

где P_H – вероятность битовой ошибки в сигнале ГМ;

P_{Db} – вероятность битовой ошибки в сигнале VDPSK, кратности V;

P_{Ms} – вероятность символьной ошибки в сигнале MFSK.

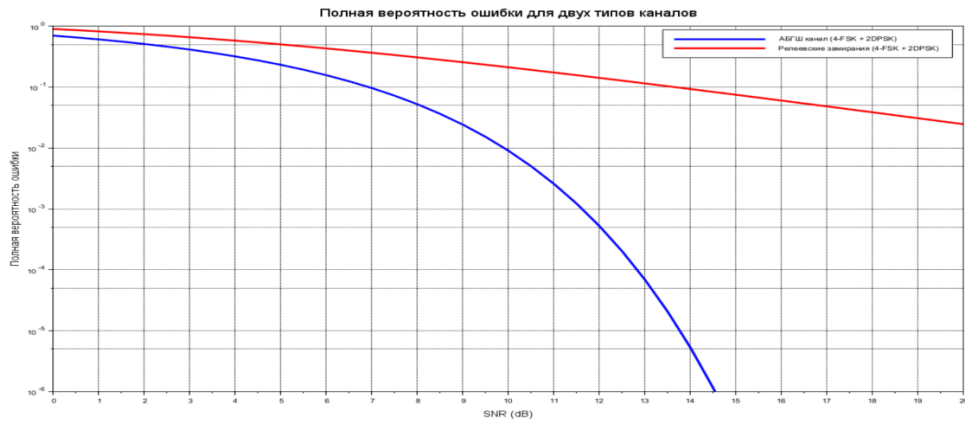


Рис. 2. Полная вероятность ошибки гибридной модуляции в каналах с АБГШ и релеевскими замираниями, рассчитанная по формуле (1)

Один из способов уменьшения вероятности ошибки P_H в (1) без увеличения мощности передающей части модема – это уменьшение скорости передачи сообщений в обмен на повышение достоверности, т. е. уменьшение вероятности ошибки (ВО). Поскольку приемлемым способом достижения поставленной цели в сформулированных выше ограничениях м. б. применение метода накопления [6] в его простейшей форме: повторной передачи или дублирования сообщения. ВО в каналах с постоянными параметрами, а для каналов с общими гладкими замираниями среднее значение ВО является функциями R-единственного параметра сигнала (SNR-отношения сигнал/шум) и, соответственно его среднего значения $R_0 = h_{av}^2 SNR$, где h_{av}^2 – квадрата амплитуды замирания.

В результате дибиты сообщений на базовом уровне 4FSK передают без изменений на двух смежных интервалах T_s : (n-1)-ым «референтным» и n-ым «демодулируемым».

Квадратурные компоненты X_{n-1}, Y_{n-1} и X_n, Y_n , необходимые для демодуляции дибита 2DPSK, определяются на каждом интервале T_s и хранятся в ячейках памяти всех частотных подканалов демодулятора, а затем поступают на схему вычисления разности фаз $\Delta\varphi_i(n)$. Оценки амплитуд подканалов демодулятора на (n-1)-ом интервале хранятся в соответствующих ячейках памяти, а далее суммируются с такими же оценками амплитуд на n-ом интервале для определения оценок $\hat{A}_i(n2T)$.

Выбирается дибит, полученный по подканалу частоты f_i с максимальным значением $\hat{A}_i(n2T)$ в этом подканале. По хранящимся значениям квадратурных компонент i -го подканала определяют $\Delta\hat{\phi}_i(n-1)$ как оценку разности фаз по комбинированию X_{n-2}, Y_{n-2} и X_{n-2}, Y_{n-2} и $\Delta\hat{\phi}_i(n)$ как оценку разности фаз по комбинированию X_{n-1}, Y_{n-1} и X_n, Y_n , причем последняя пара сохраняется в качестве квадратурных компонент «референтного» сигнала при демодуляции дибита $n+1$ сигнала 2DPSK.

Сохраняя схему, работающую с максимальной скоростью передачи, целью совместимости с предлагаемым режимом, дополним её демодулятор простым устройством задержки на время T_s .

Сделать вывод о целесообразности использования предлагаемого режима возможно сравнением характеристики ВО (1) с достигнутой ВО, которая м.б. получена использованием в (1) для значений аргумента $SNR=R(R_0)$ численные значения $P_{Ms}(2R(2R_0))$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Результаты полученных расчетов представлены в виде графиков (рис. 3).

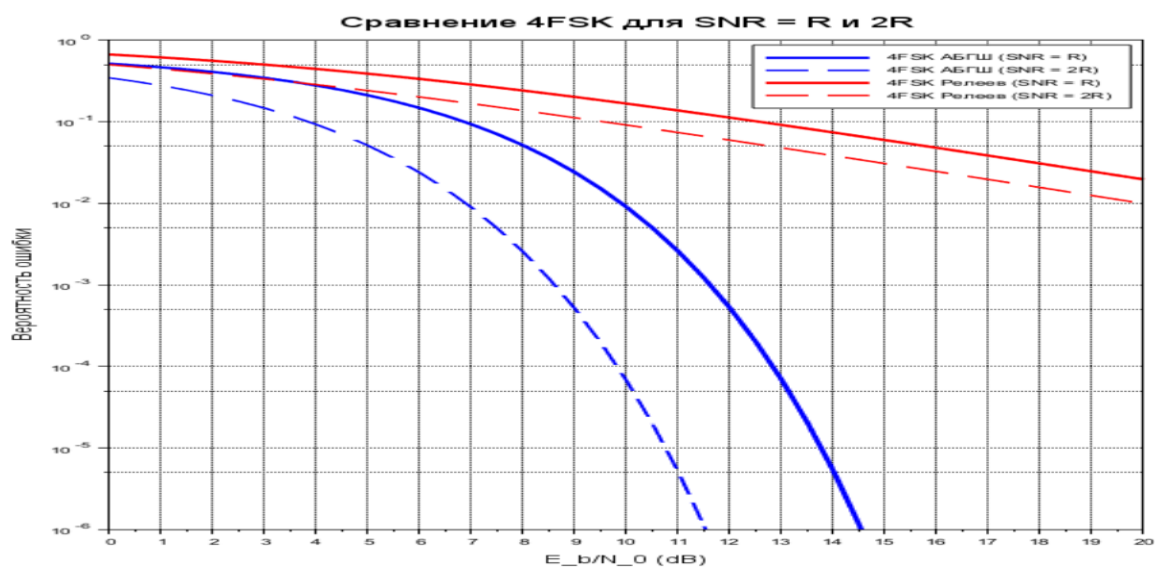


Рис. 3. Графики ВО 4FSK для R и $2R$ для каналов с АБГШ и релейскими замираниями

Применение такого метода в обоих типах каналов позволяет получить выигрыш в помехоустойчивости ~ 3 дБ. Т. о. потери в скорости передачи на 25 % позволяют получить двукратный выигрыш в помехоустойчивости.

Список источников

1. LPWAN White Paper. Leverage LLC, Rockwille, USA 2020. 24 p.
2. Елисеев С. Н. Передача сообщений в узкополосных сетях дальнего радиуса действия диапазона УКВ // Технологии информационного общества : материалы XIII Международной отраслевой научно-технической конференции. Т. 1. Москва : ООО «Издательский дом Медиа Пабlishер», 2019. С. 208–209.
3. Курочкин Г. А. Многорежимный терминал для узкополосных радиоканалов // Телекоммуникации и информационные технологии - реалии, возможности, перспективы : сборник трудов XVI Молодежного научного форума Москва : МТУСИ, 2025. С. 9-102.
4. Proakis J. G., Salehi M. Digital Communications. 5th edition. McGraw-Hill, 2007. 1150 p. ISBN-13 978-0072957167.
5. Технологии OFDM : учебное пособие для студентов вуза / М. Г. Бакулин, В. Б. Крейнделин, А. М. Шлома, А. П. Шумов. Москва : Горячая линия-Телеком, 2021. 351 с. ISBN 978-5-9912-0549-8.
6. Харкевич А. А. Борьба с помехами. Москва : Наука, 1965. 276 с.
7. Bibiana X. A. Design of an OFDM-DQPSK Simulation Model : Master thesis. Technische Universiteit Eindhoven, 2022. 74 p. The electronic version of print. publ. URL: <https://pure.tue.nl/ws/files/46803588/564816-1.pdf> (date of request: 15.11.2025).
8. Кологринов В. А., Игумнова Н. А. Исследование 4FSK модуляции при неортогональном разнесении несущих : методические указания для студентов направления «Инфокоммуникационные технологии и системы связи». Томск, 2022. 20 с.
9. Veřtát I., Mráz J. Hybrid MFSK/DQPSK modulations for Cubesat picosatellites // Radioengineering. 2013. Vol. 22, No. 1. P. 389–393.
10. WAVECOM® W-Signal-Library: A collection of reference signals. Zurich : WAVECOM ELEKTRONIK AG, 2025. 4 p. The electronic version of print. publ. URL: chrome-extension://efaidnbmninnibpcajpcglclefindmkaj/https://wavecom.ch/content/pdf/brochure_w-signal-library.pdf (date of request: 15.11.2025).

**ОБНАРУЖЕНИЕ ИЗЛУЧЕНИЙ ГЕНЕРАТОРА
ПОМЕХ НА ОСНОВЕ КОНТРОЛЯ ЗАГРУЖЕННОСТИ
РАДИОЧАСТОТНОГО СПЕКТРА**

ЕРМАКОВ Максим Дмитриевич, магистрант
кафедры радиотехники
Воронежский государственный технический университет
394006, Россия, Воронеж, ermakovmd@ircoc.vrn.ru

ТОКАРЕВ Антон Борисович, доктор технических наук,
доцент, профессор кафедры радиотехники
Воронежский государственный технический университет
394006, Россия, Воронеж, tokarevab@ircoc.vrn.ru

Аннотация. С развитием систем связи свою популярность приобрели устройства радиоглушения и подавления, так как вопрос конфиденциальности информации обрел особую актуальность. Целью работы являлась разработка алгоритма, который позволит выявлять факт наличия генератора помех в эфире на фоне легитимных радиосигналов.

Ключевые слова: радиоконтроль, генератор помех, энергетическое обнаружение узкополосных радиосигналов, девиация загрузки частотного спектра.

**DETECTION OF INTERFERENCE GENERATOR
EMISSIONS BASED ON MONITORING OF RADIO
FREQUENCY SPECTRUM UTILIZATION**

ERMAKOV Maxim Dmitrievich, student
Voronezh State Technical University
394006, Russia, Voronezh, ermakovmd@ircoc.vrn.ru

TOKAREV Anton Borisovich, Doctor of Engineering Sciences,
Associate Professor, Professor at the Department of Radio Engineering
Voronezh State Technical University
394006, Russia, Voronezh, tokarevab@ircoc.vrn.ru

Abstract. With the development of communication systems, radio jamming and suppression devices have gained popularity, as the issue of information

confidentiality has become relevant. The aim of the work was to develop an algorithm that would allow detecting the presence of an interference generator on the air against the background of electromagnetic radio signals.

Keywords: radio monitoring, interference generator, energy detection of narrowband radio signals, frequency spectrum congestion deviation.

ВВЕДЕНИЕ

В целях предотвращения утечки информации во время проведения важных совещаний или переговоров может применяться генератор помех. Принцип работы такого генератора заключается в том, что он излучает набор узкополосных радиоизлучений и закрывает типовые каналы передачи информации. Характерным признаком работы генератора помех является синхронность появления его спектральных составляющих в эфире.

ОПИСАНИЕ АЛГОРИТМА

Анализ радиообстановки в широких полосах частот (1) предполагает преобразование временных выборок регистрируемых широкополосных радиосигналов в дискретный энергетический спектр с помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ) с последующим обнаружением всплесков в полученных спектрограммах. В качестве исходных данных для анализа применяется усредненный энергетический спектр диапазона частот

$$X_R(n) = \frac{1}{R} \cdot \sum_{r=1}^R \left| \dot{c}_{(r)}(n) \right|^2, \quad (1)$$

где n – номер спектрального отсчета, r – номер очередной выборки $u_{\text{ex}}(t)$, R – количество усредняемых выборок.

При классическом энергетическом обнаружении решение о наличии сигнала принимается при выполнении условия $X_R(n) \geq x_{\text{nop}}$. Шумовые отсчеты энергетического спектра $X_R(n)$ описываются центральным χ^2 – распределением, для которого порог x_{nop} , соответствующий условию $P\{\chi^2 \geq x_{\text{nop}}\} = \varepsilon$, определяется соотношением (2)

$$x_{nop} = \sigma_{\xi 1}^2 \cdot \left\{ 1 - \frac{1}{9R} + x_{\varepsilon} \sqrt{\frac{1}{9R}} \right\}^3, \quad (2)$$

где x_{ε} – соответствующая ε процентная точка гауссовского распределения, $\sigma_{\xi 1}^2$ – мощность шума, приходящаяся на каждый отсчет спектра.

Важным для обнаружения генератора помех показателем, описывающим изменения в радиообстановке, является загруженность, которая показывает степень использования радиочастотного спектра радиосигналами шириной Δf_i в заданном диапазоне частот ΔF в конкретный момент времени

$$\delta_r = \Delta F^{-1} \sum_i \Delta f_i. \quad (3)$$

При синхронном появлении в эфире всех составляющих излучения генератора помех загруженность радиочастотного спектра будет претерпевать резкие изменения. Соответствующий пример показан на рис. 1, где выделены моменты времени, соответствующие включению и выключению генератора помех.

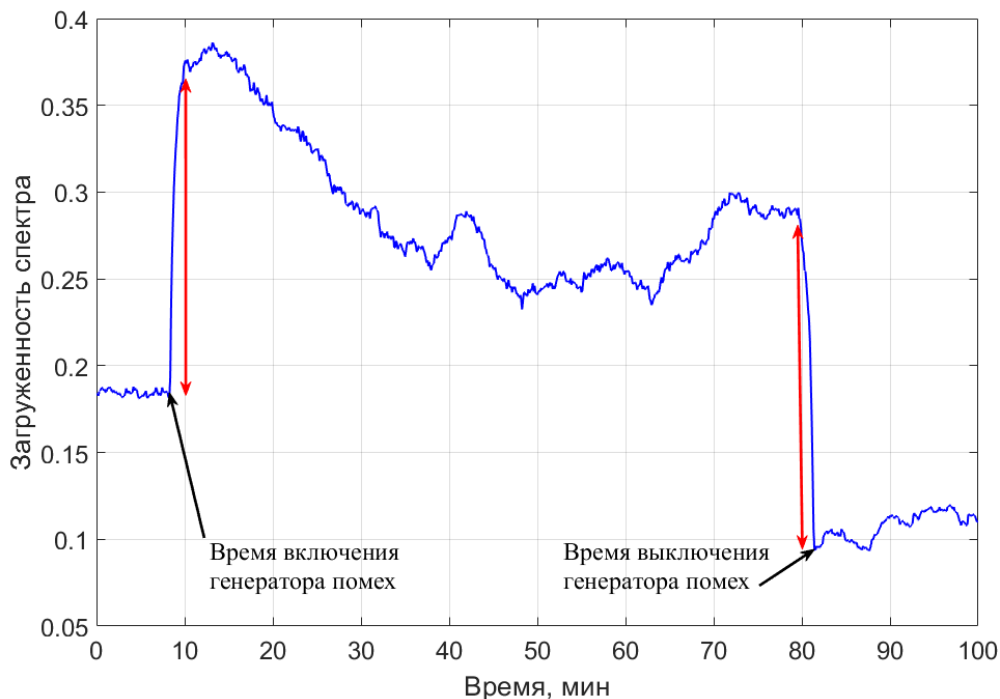


Рис. 1. Зависимость загруженности частотного спектра от времени

Стоит отметить, что резкие изменения загруженности могут быть вызваны и другими причинами: перегруз радиоприемного устройства при попытке приема мощного сигнала, одновременный выход нескольких легитимных радиостанций

в эфир, появление кратковременной импульсной помехи. Исходя из этого необходимо накапливать статистику об изменении загруженности за некоторый промежуток времени, такая статистика называется девиацией загруженности. Важно отметить, что при непрерывном радиоконтроле некоторое время затрачивается на накопление одной спектрограммы, из-за чего мы можем пропустить момент включения или выключения генератора помех. Поэтому девиация загруженности рассчитывается через 2 спектрограммы, благодаря чему удастся регистрировать всплески девиации в полном объеме. Исходя из этого девиация загруженности частотного спектра может быть рассчитана из следующего выражения:

$$\Delta\delta_r = \delta_{r+2} - \delta_r, \quad (4)$$

где δ_r – загруженность спектра в текущий момент времени, δ_{r+2} – загруженность в момент времени $r + 2$.

Таким образом, задача выявления генератора помех на фоне легитимных радиосигналов сводится к поиску узких пиков и провалов в девиации загруженности сопоставимых по абсолютной величине и наблюдаемых с интервалом от единиц минут до нескольких часов. Для выявления всплесков формируется порог, который устанавливается в зависимости от контролируемого диапазона частот. Практика показывает, что применительно к диапазону частот в 100 МГц имеет смысл использовать значение порога порядка 15 %. На рис. 2 приведена характерная для генератора помех зависимость от времени девиации загруженности спектра. Момент превышения девиацией загруженности положительного порога соответствует предполагаемому времени включения генератора помех, а превышение отрицательного порога – времени выключения генератора помех.

ВЫВОДЫ

Предложенный в работе алгоритм позволяет обнаруживать факты выхода в эфир генератора помех в широкой полосе частот и определять частотно-временные параметры его излучения.

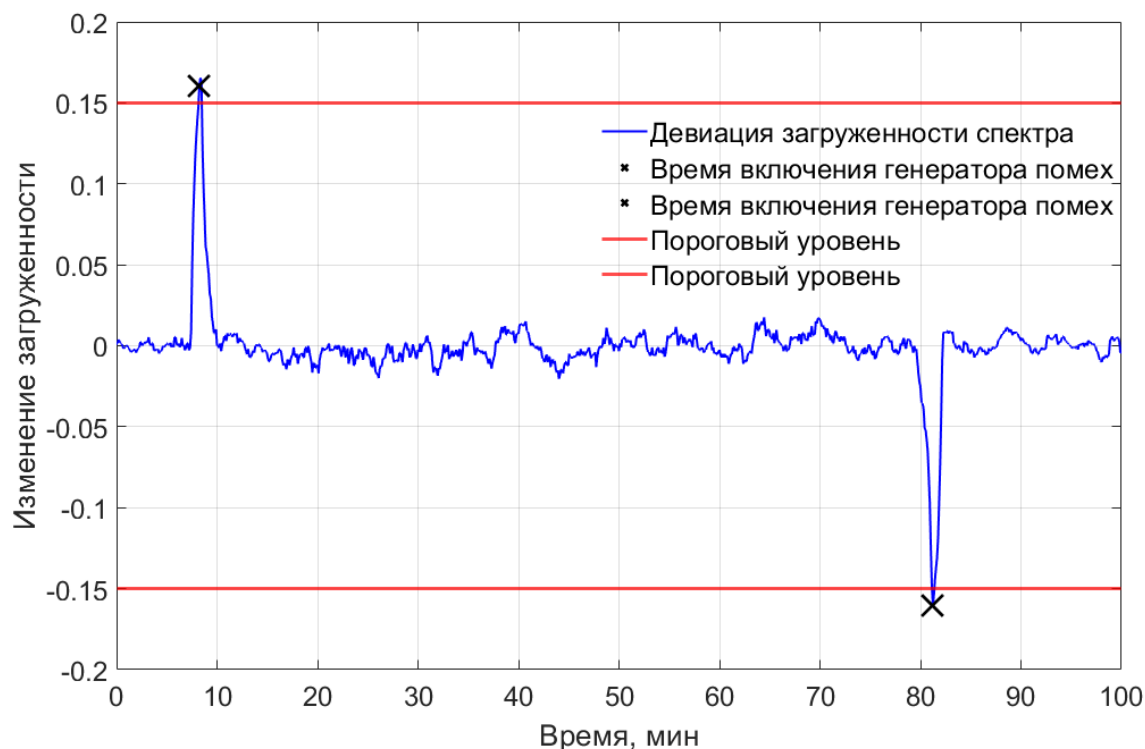


Рис. 2. Пример обнаружения генератора помех

Список источников

1. Рембовский А. М., Ашихмин А. В., Козьмин, В. А. Радиомониторинг. Задачи, методы, средства / под ред. А. М. Рембовского. 4-е изд., испр. И доп. Москва : Горячая линия-Телеком, 2015. 640 с. ISBN 978-5-9912-0479-8.
2. Рембовский А. М., Ашихмин А. В., Козьмин В. А. Автоматизированные системы радиоконтроля и их компоненты. Москва : Горячая линия-Телеком, 2018. 423 с. ISBN 978-5-9912-0651-8.

**РАЗРАБОТКА ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОЙ
ВЕБ-СИСТЕМЫ ДЛЯ АНАЛИЗА
СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ ТЕКСТОВЫХ КОРПУСОВ**

ЗАПЬЯНЦЕВ Олег Васильевич, бакалавр
*Поволжский государственный университет
телекоммуникаций и информатики
443010, Россия, г. Самара, oleg.zapyantsev@mail.ru*

СТЕФАНОВА Ирина Алексеевна, кандидат технических наук
доцент кафедры информатики и робототехнических систем
*Поволжский государственный университет
телекоммуникаций и информатики
443010, Россия, г. Самара, aistivt@gmail.com*

Аннотация: Представлена разработка высокопроизводительной веб-системы для анализа специализированных текстовых корпусов. Актуальность работы обусловлена ростом объемов текстовых данных в таких областях, как информатика и искусственный интеллект. Целью исследования является создание масштабируемой клиент-серверной архитектуры с применением современных веб-технологий и алгоритмов NLP. В ходе работы реализованы функции эффективного поиска, частотного анализа и анализа коллокаций. Созданный прототип обрабатывает корпус объемом свыше 1,2 млн слов. Тестирование подтвердило высокую производительность и практическую полезность системы для исследователей.

Ключевые слова: веб-система, анализ корпусов, обработка естественного языка (NLP), высокопроизводительные вычисления, клиент-серверная архитектура.

**DEVELOPMENT OF A HIGH-PERFORMANCE
WEB SYSTEM FOR ANALYZING
SPECIALIZED TEXT CORPORA**

ZAPYANTSEV Oleg Vasilyevich, bachelor
*Volga State University of Telecommunications and Informatics
443010, Russia, Samara, oleg.zapyantsev@mail.ru*

Abstract. This article presents the development of a high-performance web system for analyzing specialized text corpora. The relevance of the work is driven by the growing volume of textual data in fields such as computer science and artificial intelligence. The research aims to create a scalable client-server architecture using modern web technologies and NLP algorithms. Key implemented functions include efficient search, frequency analysis, and collocation analysis. The developed prototype processes a corpus of over 1.2 million words. Testing confirmed the system's high performance and practical utility for researchers.

Keywords: web system, corpus analysis, natural language processing (NLP), high-performance computing, client-server architecture.

ВВЕДЕНИЕ

Рост объемов цифровой текстовой информации ставит перед областью информатики и вычислительной техники (ИВТ) сложные задачи по ее обработке, хранению и анализу [1]. Специализированные текстовые корпуса, содержащие техническую документацию, научные публикации и патенты, являются критически важным ресурсом для решения задач информационного поиска, анализа предметных областей и обучения моделей искусственного интеллекта [2]. Эффективная обработка таких массивов данных требует создания специализированных программных комплексов, сочетающих высокую производительность, масштабируемость и удобный интерфейс [3].

Существующие программные решения для анализа корпусов (например, AntConc, Sketch Engine) зачастую представляют собой десктопные приложения, что ограничивает их доступность и возможности коллективной работы [4]. Кроме того, их архитектура не всегда ориентирована на интеграцию с современными веб-стандартами и облачными сервисами. В связи с этим актуальной является задача разработки веб-ориентированных систем, основанных

на современных подходах к проектированию высоконагруженных информационных систем [5].

Целью данного исследования является разработка и апробация архитектуры высокопроизводительной веб-системы для анализа специализированных текстовых корпусов, ориентированной на решение прикладных задач в области ИВТ.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В ходе работы была спроектирована и реализована клиент-серверная система, архитектура (рис. 1).

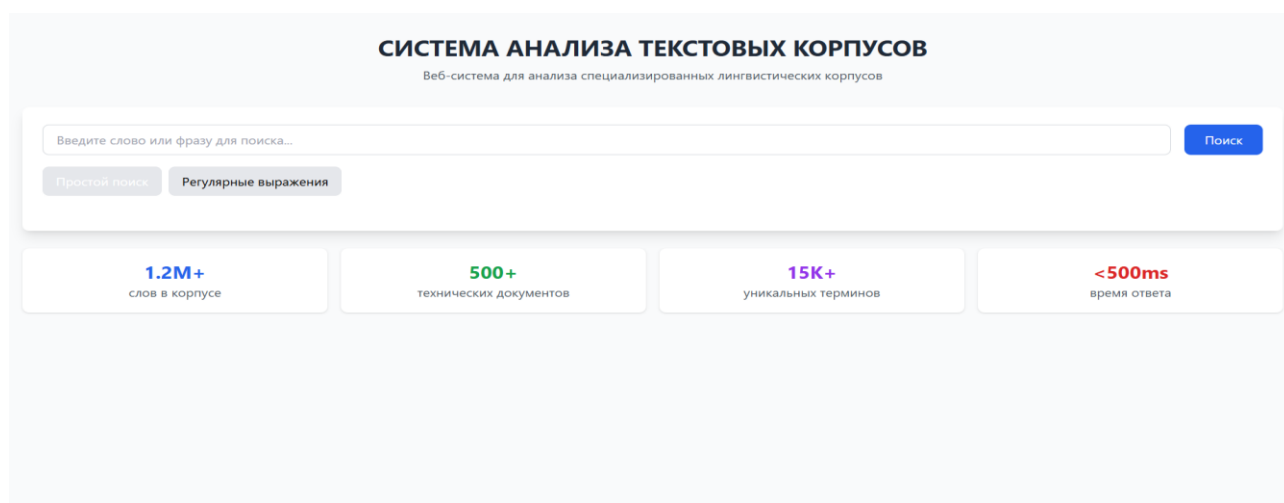


Рис. 1. Архитектура разработанной веб-системы

Серверная часть (бэкенд) реализована на платформе Node.js с использованием фреймворка Next.js, что обеспечивает высокую скорость обработки запросов и возможность серверного рендеринга (SSR). Для хранения метаданных текстов и поисковых индексов применяется реляционная СУБД PostgreSQL, выбранная за свою надежность, поддержку полнотекстового поиска и способность эффективно работать с большими объемами структурированных данных. Обработка текстовых данных, включая токенизацию и лемматизацию, выполняется с использованием библиотеки SpaCy, интегрированной в серверные процессы предобработки.

Клиентская часть (фронтенд) построена на библиотеке React в связке с Next.js, что позволяет создавать высокоинтерактивные одностраничные приложения (SPA)

с отзывчивым пользовательским интерфейсом. Для стилизации использовался фреймворк Tailwind CSS.

Были разработаны и реализованы следующие ключевые функциональные модули системы:

- Модуль индексирования и поиска: обеспечивает быстрое выполнение запросов по корпусу с поддержкой ключевых слов, фраз и регулярных выражений. Для ускорения поиска применяются индексы PostgreSQL.
- Модуль частотного анализа: строит ранжированные списки слов и N-грамм. Алгоритм оптимизирован для работы с большими массивами данных.
- Модуль анализа коллокаций: выявляет статистически значимые словосочетания с расчетом мер ассоциации (MI-score, t-score).

Для оценки производительности системы был проведен ряд тестов. Время отклика системы на типовой поисковый запрос по корпусу объемом 1,2 млн слов не превышает 500 мс. Сравнительный анализ потребления оперативной памяти показал, что использование кэширования на стороне сервера позволяет снизить нагрузку на СУБД на 30–40% при повторяющихся запросах (табл. 1).

Таблица 1

Сравнительные характеристики производительности

Операции	Время выполнения (мс)	Загрузка CPU (%)
Простой поиск по слову	~150	15-20
Частотный анализ	~1200	40-50
Построение конкорданса	~450	25-35

Интерфейс системы предоставляет пользователю интуитивно понятные инструменты для формирования запросов и визуализации результатов в виде интерактивных таблиц и графиков.

ВЫВОДЫ

Разработанный веб-сервис представляет собой полнофункциональное программное решение, предназначенное для анализа больших текстовых корпусов в области информатики и вычислительной техники. Применение современного стека технологий (Next.js, React, Node.js, PostgreSQL) позволило создать производительную, масштабируемую и удобную в использовании систему.

Практическая значимость проведенной работы заключается в следующем:

- Создан специализированный аналитический инструмент, позволяющий исследователям и разработчикам изучать терминологические особенности и выявлять устойчивые языковые конструкции в технических текстах.
- Заложена архитектурная основа для разработки более сложных аналитических систем, включая интеллектуальные поисковые механизмы и автоматизированные анализаторы предметных областей.
- Практически подтверждена эффективность применения комплексного стека веб-технологий для решения ресурсоемких задач лингвистической обработки текстовых данных.

Перспективные направления развития системы предусматривают:

- интеграцию нейросетевых моделей для реализации семантического поиска и тематического моделирования;
- разработку специализированного модуля для сопоставительного анализа множественных текстовых корпусов.

Список источников

1. Manning C. D., Schütze H. Foundations of Statistical Natural Language Processing. Cambridge : MIT Press, 1999. 718 p. ISBN: 9780262133609.
2. Jurafsky D., Martin J. H. Speech and Language Processing. 3rd ed. Prentice Hall, 2023. 634 p.
3. Richardson L., Amundsen M ., Ruby S. RESTful Web APIs. O'Reilly Media, 2013. 404 p. ISBN: 978-1-4493-5806-8.
4. Anthony L. AntConc (Version 4.2.4) // Computer Software. Tokyo: Waseda University, 2023.

5. Фаулер М. Архитектура корпоративных программных приложений. Москва : Вильямс, 2020. 544 с.6. Захаров В. П., Богданова С. Ю. Корпусная лингвистика : учебно-методическое пособие. Иркутск : ИГЛУ, 2011. 161 с. ISBN 978-5-88267-316-0.

7. McEnery T., Hardie A. Corpus Linguistics: Method, Theory and Practice. Cambridge : Cambridge University Press, 2012. 312 p. ISBN: 978-0-521-83851-1.

8. Next.js Documentation : [сайт]. URL: <https://nextjs.org/docs> (date of request: 15.10.2025).

9. SpaCy Documentation: [сайт]. URL: <https://spacy.io> (date of request: 15.10.2025).

10. PostgreSQL Documentation: [сайт]. URL: <https://www.postgresql.org/docs/> (date of request: 15.10.2025).

**МЕТОД КЛАСТЕРИЗАЦИИ СПЕКТРАЛЬНОЙ
ПЛОТНОСТИ МОЩНОСТИ АКУСТИЧЕСКИХ
СИГНАЛОВ ДЛЯ ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ
ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ЯЧЕЕК КРУ 6-10 КВ**

ИНАХОДОВА Лолита Меджидовна, кандидат технических наук, доцент
Самарский государственный технический университет
443100, Россия, г. Самара, inahodova@mail.ru

ЯРОСЛАВКИНА Екатерина Евгеньевна,
кандидат технических наук, доцент
Самарский государственный технический университет
443100, Россия, г. Самара,
k0046979@yandex.ru

ФРОЛОВ Кирилл Владимирович, старший преподаватель
Самарский государственный технический университет
443100, Россия, г. Самара, riksot@mail.ru

Аннотация. Рассматривается подход к диагностической оценке состояния ячеек комплектных распределительных устройств (КРУ) 6-10 кВ на основе кластеризации спектральной плотности мощности акустических сигналов, регистрируемых бесконтактными датчиками в составе информационно-измерительной системы непрерывного мониторинга. Описан принцип формирования признаков на основе оценок спектральной плотности мощности в ультразвуковом диапазоне и применение метода главных компонент для снижения размерности признакового пространства. Показано, что сформированная таким образом диагностическая карта обеспечивает разделение реализаций акустических сигналов на области нормального, предаварийного и аварийного режимов работы КРУ с высокой вероятностью отнесения реализаций к соответствующим состояниям.

Ключевые слова: акустическая диагностика, спектральная плотность мощности, метод главных компонент.

**METHOD OF CLUSTERING THE SPECTRAL POWER DENSITY
OF ACOUSTIC SIGNALS FOR DIAGNOSTIC ASSESSMENT
OF THE STATE OF 6-10 KV SWITCHGEAR CELLS**

INAKHODOVA Lolita Medzhidovna,
Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor
Samara State Technical University
443100, Russia, Samara, inahodova@mail.ru

YAROSLAVKINA Ekaterina Evgenievna,
Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor
Samara State Technical University
443100, Russia, Samara, k0046979@yandex.ru

FROLOV Kirill Vladimirovich, Senior Lecturer
Samara State Technical University
443100, Russia, Samara, riksot@mail.ru

Abstract. The article presents an approach to diagnostic assessment of the condition of switchgear cells rated 6–10 kV, based on clustering the power spectral density of acoustic signals recorded by non-contact sensors within a continuous monitoring information and measurement system. The principle of feature formation is described, which relies on estimates of power spectral density in the ultrasonic range, as well as the application of principal component analysis to reduce the dimensionality of the feature space. It is shown that the diagnostic map formed in this manner ensures separation of acoustic signal realizations into regions corresponding to normal, pre-fault, and fault operating modes of the switchgear cells, with a high probability of correctly assigning realizations to the respective states.

Keywords: acoustic diagnostics, power spectral density, principal component analysis.

Повышение надежности ячеек комплектных распределительных устройств (КРУ) 6-10 кВ является приоритетной задачей электроэнергетики России. Основная доля повреждений связана с деградацией изоляции и развитием частичных и дуговых разрядов, которые приводят к тепловому и электрическому разрушению элементов и создают риски для персонала [1–4].

Традиционные методы контроля не обеспечивают непрерывного мониторинга и не позволяют выявлять предаварийные состояния на ранней стадии.

Акустические методы диагностики обладают уникальными преимуществами: бесконтактность, отсутствие гальванической связи с высоковольтной цепью, возможность непрерывного контроля без вывода оборудования из эксплуатации [3, 4].

Ранее авторами разработана информационно-измерительная система бесконтактного акустического мониторинга КРУ 6–10 кВ и алгоритмы обработки сигналов для оценки состояния контактных соединений и изоляторов [5–7].

Настоящая работа развивает спектрально-кластерный подход: предлагается метод кластеризации оценок спектральной плотности мощности (СПМ) с использованием метода главных компонент (РСА) и модели смеси нормальных распределений, что позволяет формировать диагностическую карту и надежно разделять три режима работы оборудования.

Объектом исследования являются временные реализации акустических сигналов частичных и дуговых разрядов в ячейках КРУ 6–10 кВ, зарегистрированные в составе системы непрерывного мониторинга.

Набор данных включает три типовых режима: нормальный (отсутствие признаков деградации изоляции); предаварийный (устойчивые частичные разряды); аварийный (развитые дуговые процессы с высокой акустической активностью).

Данные получены на действующих ячейках и стендовой установке [5–7]. Частота дискретизации обеспечивала захват ультразвукового диапазона до 80 кГц. Предварительная обработка включала центрирование сигналов и удаление артефактов. Из длительных записей формировались перекрывающиеся оконные фрагменты фиксированной длины для последующего спектрального анализа.

Оценка СПМ выполнялась методом Уэлча [8]: записи разбивались на перекрывающиеся (50 %) отрезки, на каждый накладывалось окно Хэмминга. Диапазон анализа 5–80 кГц, разрешение по частоте 100 Гц.

После получения периодограммы выполнялся переход к логарифмическому масштабу (дБ) и нормирование по суммарной мощности в диапазоне.

Нормирование устраняет влияние общего уровня сигнала и делает признаки инвариантными к расстоянию до датчика и усилению тракта.

На рис. 1 приведены типовые оценки СПМ для трёх режимов. Нормальный режим характеризуется плавным спадом в сторону высоких частот; предаварийный – выраженным максимумом в ультразвуковой области (около 20-40 кГц); аварийный – высоким уровнем и широкополосным спектром.

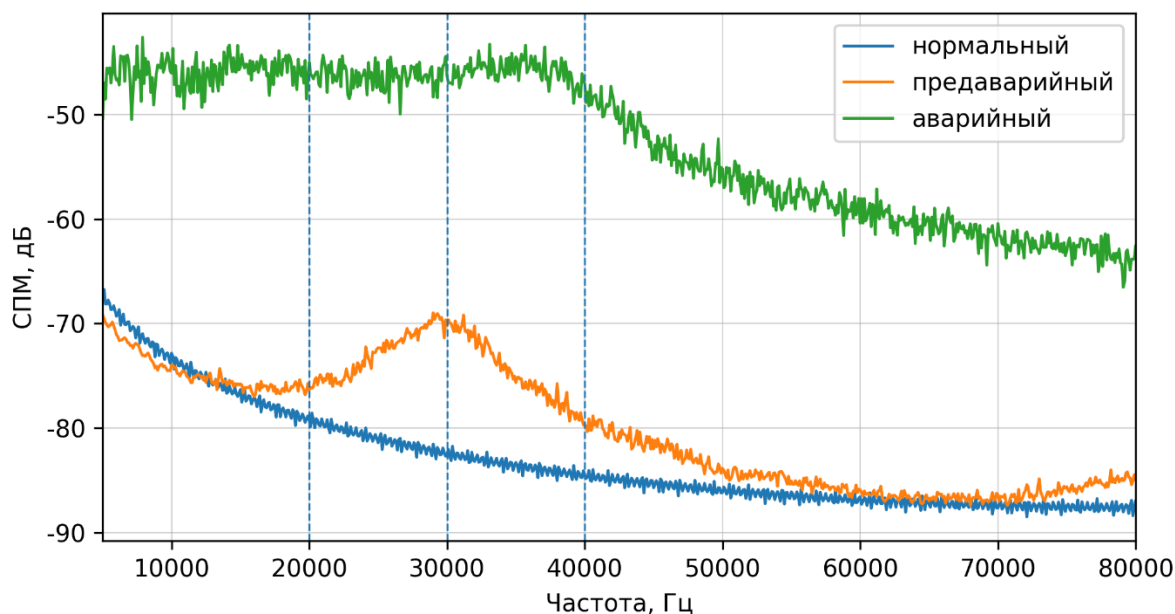


Рис. 1. Оценка спектральной плотности мощности акустического сигнала

Применялся метод главных компонент после стандартизации признаков. На модельном наборе данных (600 оконных реализаций, по 200 на каждый режим) первые две главные компоненты объяснили 98,63 % общей дисперсии (ГК-1 63,43 %, ГК-2 35,20 %).

Параметры распределений режимов в пространстве ГК-1 и ГК-2 приведены в табл. 1.

Евклидовы расстояния между центрами классов составили 7,41; 7,64 и 5,84 соответственно, что существенно превышает внутриклассовый разброс $\sigma = 0,5-1,0$.

Классификация по правилу ближайшего центра дала матрицу ошибок с одной ошибочной реализацией (аварийный режим ошибочно отнесен к предаварийному). Общая точность составила 99,83 %.

Параметры распределения режимов в пространстве главных компонент

Режим	Координата центра по ГК-1	Координата центра по ГК-2	СКО по ГК-1	СКО по ГК-2	Число оконных реализаций
Нормальный	4,619	0,223	0,506	0,475	200
Предаварийный	-2,041	-3,020	0,491	0,583	200
Аварийный	-2,579	2,797	0,890	1,001	200

Диагностическая карта, построенная по правилу ближайшего центра, представлена на рис. 2.

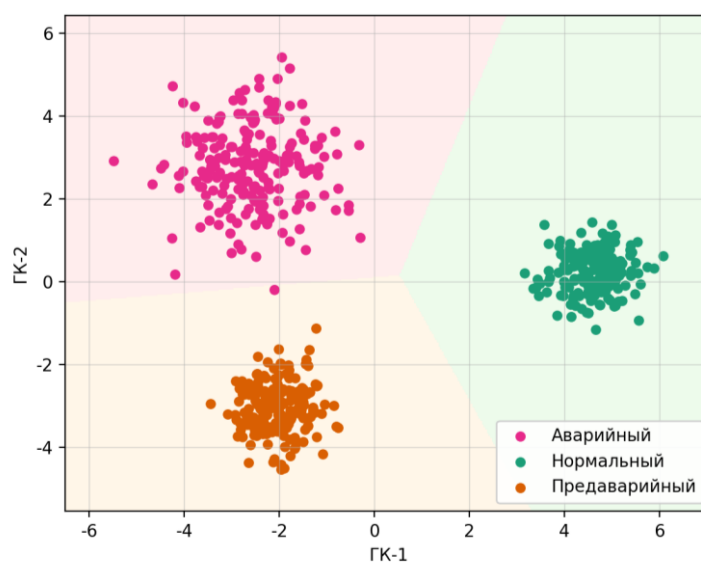


Рис. 2. Диагностическая карта в пространстве первых двух главных компонент ГК-1, ГК-2

Разработан и экспериментально обоснован метод диагностики состояния ячеек КРУ 6-10 кВ по акустическим сигналам на основе кластеризации нормированных оценок СПМ с применением метода главных компонент. Первые две главные компоненты сохраняют 98,63 % дисперсии и обеспечивают четкое разделение нормального, предаварийного и аварийного режимов. Точность классификации модельных данных достигает 99,83 %.

Метод пригоден для внедрения в системы непрерывного мониторинга. Перспективы развития: использование полноценной модели смеси нормальных распределений, учет априорных вероятностей режимов, интеграция акустических признаков с электрическими и тепловыми параметрами в единой цифровой платформе диагностики.

Список источников

1. Об утверждении методики оценки технического состояния основного технологического оборудования и линий электропередачи электрических станций и электрических сетей : приказ Минэнерго России от 26 июля 2017 г. № 676 // Официальное опубликование правовых актов. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201710060003> (дата обращения: 15.11.2025).
2. Об утверждении требований к обеспечению надежности электроэнергетических систем, надежности и безопасности объектов электроэнергетики и энергопринимающих установок : приказ Минэнерго России от 25 октября 2017 г. № 1013 // Официальное опубликование правовых актов. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001201803270025> (дата обращения: 15.11.2025).
3. Акустическая диагностика и контроль на предприятиях топливно-энергетического комплекса / В.М. Баранов и др. Москва : Наука, 1998. 304 с. ISBN 5-02-003639-0.
4. Вдовико В. П. Методология системы диагностики электрооборудования высокого напряжения // Электричество. 2010. № 2. С. 14–20.
5. Инаходова Л. М., Фролов К. В. Исследование звукового излучения контактных соединений распределительных устройств подстанций. DOI 10.53015/18159958_2021_4_26 // Вести высших учебных заведений Черноземья. 2021. № 4 (66). С. 26–32.
6. Фролов К. В., Инаходова Л. М. Экспериментальное исследование информационных параметров акустического шума. DOI 10.21685/2307-5538-2024-2-3 // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2024. № 2 (48). С. 25–31.

7. Фролов К. В., Инаходова Л. М. Алгоритмическая обработка акустических сигналов для выявления предаварийных и аварийных состояний комплектных распределительных устройств // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2025. Т. 33, № 3. С. 111–120.

8. Лайонс Р. Цифровая обработка сигналов / пер. с англ. 2-е изд. Москва : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. 656 с. ISBN 5-9518-0149-4.

9. Marple S. L. Digital Spectral Analysis with Applications. Englewood Cliffs : Prentice-Hall, 1987. 492 p. ISBN 0132141493.

10. Johnson R. A., Wichern D. W. Applied Multivariate Statistical Analysis. 6th ed. Upper Saddle River : Pearson, 2007. 773 p. ISBN 0-13-187715-1.

**ДИАГНОСТИКА СВЕТОДИОДОВ И СВЕТОДИОДНЫХ
МАТРИЦ МЕТОДОМ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО
ОТКЛИКА С ЛОКАЛЬНЫМ ФОТОВОЗБУЖДЕНИЕМ**

КАЗАНКОВ Александр Александрович, ведущий инженер
УФИРЭ имени В. А. Котельникова РАН
432011, Россия, Ульяновск
аспирант
Ульяновский государственный технический университет
432027, Россия, Ульяновск, kazanaa1992@mail.ru

Аннотация. В работе описана экспериментальная измерительная установка и представлены результаты применения метода фотоэлектрического отклика с локальным фотовозбуждением (ФОЛФ) для диагностики светоизлучающих гетероструктур, СОВ матриц. Показано, что ФОЛФ позволяет визуализировать неоднородности люминесценции, дефекты р-п-переходов, локальные участки с пониженной эффективностью инжекции носителей заряда, а также микродефекты кристаллической структуры. Проведена экспериментальная апробация метода ФОЛФ на промышленных однокристалльных светодиодах CREE и светодиодных матрицах типа ILO-01FF5-13NW-EC211.

Ключевые слова: светодиод, светодиодная матрица, фотоэлектрический отклик, локальное фотовозбуждение, отбраковка, диагностика дефектов кристалла, неоднородность люминесценции.

**DIAGNOSTICS OF LEDs AND LED MATRICES
USING THE PHOTOELECTRIC RESPONSE
METHOD WITH LOCAL PHOTOEXCITATION**

KAZANKOV Aleksandr Aleksandrovich, leading engineer
Ulyanovsk branch of the Kotelnikov Institute
of Radioengineering and Electronics of RAS
432011, Russia, Ulyanovsk
PhD student
Ulyanovsk State Technical University
432027, Russia, Ulyanovsk, kazanaa1992@mail.ru

Abstract. This paper describes an experimental measurement setup and presents the results of applying the photoelectric response method with local photoexcitation (also known as LBIC – Light Beam Induced Current) for diagnostics of light-emitting heterostructures and COB matrices. It is shown that the LBIC method enables visualization of luminescence inhomogeneities, p-n junction defects, local areas with reduced charge carrier injection efficiency, as well as microdefects in the crystal structure. Experimental testing of the LBIC method was conducted on commercial single-crystal CREE LEDs and ILO-01FF5-13NW-EC211 LED matrices.

Keywords: LED, LED matrix, photoelectric response, local photoexcitation, quality control, crystal defect diagnostics, luminescence inhomogeneity.

ВВЕДЕНИЕ

Светоизлучающие диоды, в особенности структуры на основе нитрида галлия (GaN/InGaN), нашли широкое применение в осветительной технике, элементах подсветки полноцветных дисплеев и проекторов. Ключевыми требованиями к данным устройствам являются высокая однородность оптических и электрических характеристик всех элементов конечного устройства. Особую актуальность эта проблема приобретает в устройствах с последовательным соединением светодиодов, таких как бытовые светодиодные лампы и системы подсветки LCD-телевизоров, где выход из строя одного элемента приводит к потере работоспособности всего устройства.

Традиционные методы контроля, такие как измерение вольт-амперных характеристик (ВАХ) [1-3] и внутренней квантовой эффективности, не позволяют локализовать дефекты в кристаллах [4]. Методы оптической микроскопии выявляют лишь поверхностные повреждения, но не функциональные дефекты внутри структуры. В работах [5, 6] показано, что информативным параметром, характеризующим степень дефектности светоизлучающей гетероструктуры, является пороговый ток.

Метод ФОЛФ лишен этих недостатков и широко применяется при разработке методик диагностики однокристалльных светоизлучающих и фотоприемных структур на основе различных технологий и полупроводниковых

материалов. Метод ФОЛФ основан на сканировании поверхности образца сфокусированным лучом лазера, энергия фотонов которого превышает ширину запрещенной зоны полупроводника. Поглощение света в локальной области приводит к генерации электрон-дырочных пар. В области пространственного заряда р-п-перехода эти носители разделяются встроенным электрическим полем, создавая фотоэдс (режим холостого хода) или фототок во внешней цепи (режим короткого замыкания). Регистрация величины фототока или фото-ЭДС в функции координат лазерного пятна позволяет построить двумерную диаграмму распределения фотоэлектрического отклика по площади образца. Участки с пониженным откликом соответствуют областям с дефектами (например, дислокации, примесные кластеры, нарушения в р-п-переходе).

Целью работы является исследование возможностей метода ФОЛФ для диагностики дефектов как в светоизлучающих гетероструктурах, так и в светодиодах на их основе. В рамках исследования также решалась задача установления корреляционных связей между параметрами, регистрируемыми методом ФОЛФ, характеристиками порогового тока, а также явлениями микроплазменного пробоя в светоизлучающих структурах.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Разработана автоматизированная установка (рис. 1а) для диагностики качества светоизлучающих полупроводниковых структур методом ФОЛФ. Основу механической части измерительного комплекса составляет прецизионный XYZ-позиционер, обеспечивающий перемещение исследуемого образца светодиода (ИО) в плоскости XY в диапазоне 25×25 мм с использованием микрометрических винтов. Над позиционером расположена оптическая система, предназначенная для фокусировки лазерного излучения на поверхности образца [7]. В качестве источника возбуждения применяется полупроводниковый лазер с длиной волны 405 нм.

Управление всеми компонентами установки осуществляется с персонального компьютера через контроллер Arduino. Для регистрации фото-ЭДС (фототока), возникающей в ИО, используется высокоточный цифровой мультиметр,

данные с которого передаются на ПК для последующего построения двумерных диаграмм распределения фотоэлектрического отклика по площади кристалла.

В качестве примера на рис. 1б показана диаграмма распределения фотоэлектрического отклика по площади кристалла светодиода XREBLU-L1-0000-00K01. Видно, что в краевых областях кристалла наблюдается как уменьшение фотоэлектрического отклика, так и увеличение его неравномерности. В периферийных зонах существенно возрастает плотность дефектов, возникающих на стадии формирования и травления гетероструктуры, что снижает эффективность локальной инжекции носителей, также в краевых областях усиливается влияние поверхностных токов утечки и уменьшается толщина активной области.

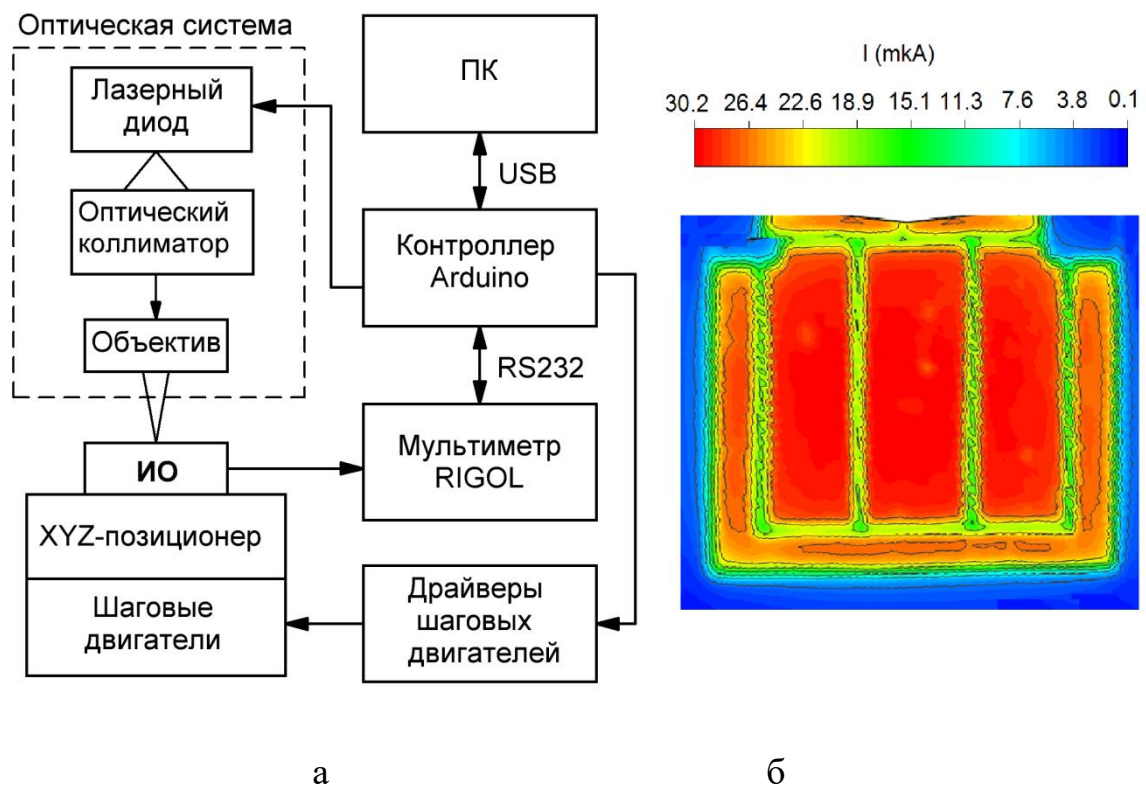


Рис. 1. Структурная схема автоматизированной установки (а), профиль распределения фотоэлектрического отклика светодиода XREBLU-L1-0000-00K01 (б)

При исследовании светодиодных матриц типа ILO-01FF5-13NW-EC211 (DURIS S 8, Intelligent LED Solutions), состоящих из десяти последовательно соединенных кристаллов, для обеспечения протекания фототока применялось внешнее обратное смещение величиной 70 В. Полученные результаты выявили не только наличие существенных неоднородностей распределения фототока

в пределах отдельных кристаллов, но и значительный разброс средних значений фототока между кристаллами матрицы (более 1,5 раз). Кристаллы с изначально пониженным фотооткликом будут работать в режиме повышенной электрической и тепловой нагрузки, что может привести к их ускоренной деградации и, как следствие, к выходу из строя всей матрицы.

Установлена положительная корреляционная связь между значениями фотоотклика отдельных кристаллов и точками начала развития микроплазменного пробоя [8]. При увеличении обратного напряжения микроплазменный пробой первоначально возникает на кристаллах с низким значением фотоотклика, после чего распространяется каскадно на остальные элементы матрицы.

ВЫВОДЫ

Метод ФОЛФ является перспективным инструментом диагностики как однокристалльных светодиодов, так и светодиодных матриц. Он позволяет выявлять дефекты кристаллов, неравномерности токораспределения, нарушения структуры р–n-перехода, предоставляет количественные данные для статистического анализа однородности отклика, что является критически важным для оценки технологического процесса и прогнозирования надежности.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН (FFWZ-2025-0001).

Список источников

1. Patent № 201035574 TW / Cheng-Huiung Chen, Yen-Chien Liu, MinHong Zhang, Guang-Zhe Zheng.
2. Patent № 2006352025 JP. METHOD OF INSPECTING LIGHT EMITTING DIODE LIGHT SOURCE, LED LIGHT SOURCE, AND FILM SCANNING DEVICE/ Hideichiro Iwahashi and Shoichi Nakano. 2007.
3. Сравнение эффективности отбраковки потенциально ненадежных светодиодов по пороговому току и прямому падению напряжения / О. А. Радаев, И. В. Фролов, В. А. Сергеев, С. А. Зайцев. DOI 10.14489/td.2025.07.pp.061-066 // Контроль. Диагностика. 2025. Т. 28, № 7(325). С. 61–66.

4. Сергеев В. А., Радаев О. А., Фролов И. В. Измеритель внутренней квантовой эффективности светодиода. DOI 10.31857/S0032816223060071 // Приборы и техника эксперимента. 2023. № 6. С. 103-110.

5. Контроль качества светодиодных COB матриц по пороговому току / Сергеев В. А., Фролов И. В., Зайцев С. А., Радаев О. А. // Журнал радиоэлектроники. 2023. №. 11. URL: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/http://jre.cplire.ru/jre/nov23/6/text.pdf> (дата обращения: 15.11.2025).

6. Радаев О. А., Сергеев В. А., Фролов И. В. Измеритель порогового тока светодиодов // Физические основы приборостроения. 2023. Т. 12, № 3(49). С. 23–27.

7. Казанков А. А., Фролов И. В., Сергеев В. А. Устройство для фокусировки лазерного излучения на поверхности исследуемых объектов // Современные проблемы проектирования, производства и эксплуатации радиотехнических систем : сборник научных трудов. Ульяновск : УлГТУ, 2025. С. 164–168.

8. Исследование светодиодных матриц в режиме микроплазменного пробоа / А. А. Казанков, С. А. Зайцев, И. В. Фролов, В. А. Сергеев. DOI 10.61527/APPFE-2025.388-390 // Актуальные проблемы физической и функциональной электроники : материалы 28-й Всероссийской молодежной научной конференции, Ульяновск, 21–23 октября 2025 года. Ульяновск : УлГТУ, 2025. С. 388-390.

9. Мальцев А. А., Мальцев И. А., Идиатуллов З. Р. Оптимальный набор характеристик светодиодов для обеспечения их надежности и качества // Радиотехника. 2024. Т. 88, № 1. С. 86–91.

10. Light emission at reverse voltage in a wide-well (In,Ga) N/GaN light-emitting diode / Bercha A. et al. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.21.054030> // Physical Review Applied. 2024. Vol. 21, iss. 5. 11 p.

РАЗРАБОТКА ИНТЕРАКТИВНОГО ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ И МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМ НЕЧЕТКОГО ЛОГИЧЕСКОГО ВЫВОДА

КАКАБЬЯН Карен Сергеевич, аспирант
*Поволжский государственный университет
телекоммуникаций и информатики
443090, Россия, Самара, kdevops32@gmail.com*

Аннотация. В статье описана разработка кроссплатформенного интерактивного веб-инструмента, который предназначен для визуального конструирования систем нечеткого вывода и пошаговой детализации всех этапов вычислений. Ключевыми преимуществами разработанного решения являются его работа непосредственно в браузере без необходимости установки, поддержка импорта и экспорта моделей в универсальный формат JSON и механизм сквозной визуализации с автоматической генерацией расчетных формул. Разработанный инструмент может использоваться как компонент образовательного пособия, а также в качестве среды быстрого прототипирования.

Ключевые слова: нечеткая логика, нечеткий логический вывод, интерактивный инструмент, визуализация, моделирование, образовательная платформа, JavaScript, функции принадлежности, MathJax, JSON.

DEVELOPMENT OF AN INTERACTIVE TOOL FOR VISUALIZATION AND MODELING OF FUZZY LOGIC INFERENCE SYSTEMS

KAKABIAN Karen Sergeevich, PhD student
*Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics
445090, Russia, Samara, kdevops32@gmail.com*

Abstract. This article presents the development of a cross-platform interactive web-based instrument for visually engineering fuzzy inference systems and providing a granular step-by-step detailing of all computational phases. The solution is distinguished by its direct in-browser operation, eliminating the need for installation, its support for model interchange via the universal JSON format and its comprehensive

visualization mechanism with automated generation of mathematical formulas. The developed instrument is intended to serve as both an educational resource and a rapid prototyping platform.

Keywords: fuzzy logic, fuzzy inference system, interactive tool, visualization, modeling, educational platform, JavaScript, membership functions, MathJax, JSON.

ВВЕДЕНИЕ

Теория нечеткой логики широко применяется в классических системах управления [1, с. 223] и поддержки принятия решений [2, с. 7; 3, с. 122]. Ее гибридные реализации также показывают высокую эффективность в задачах информационной безопасности, например, при обнаружении DDoS-атак [4, с. 87]. При этом процесс практического освоения ее аппарата сопряжен с рядом трудностей, связанных с неинтуитивным характером получения вывода.

Отраслевым стандартом для проектирования в данной области является пакет MATLAB с его компонентом Fuzzy Logic Toolbox. При всей его функциональности и наличии многофункционального графического интерфейса [5, с. 72] применение для широкого круга исследователей и в образовательном процессе существенно ограничивается необходимостью лицензирования и установки ресурсоемкого ПО, а также использованием проприетарного формата данных .fis. Альтернативные решения, к примеру, библиотека scikit-fuzzy для языка Python, ориентированы преимущественно на программную реализацию и не предоставляют средств для наглядного интерактивного конструирования. Сложившаяся ситуация определяет необходимость создания доступного веб-инструмента, который снимает вопросы установки и лицензирования и обеспечивает переносимость моделей через открытый формат данных JSON. Предложение такого решения является целью настоящей работы.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Инструмент реализован в виде кроссплатформенного одностраничного веб-приложения на базе технологий HTML5, CSS3 и JavaScript. Основой программной реализации служит централизованная модель объекта состояния,

которая содержит полное математическое описание системы. Вычислительное ядро, реализующее классический алгоритм нечеткого вывода Мамдани [6, с. 101; 7, с. 175], спроектировано как основа для механизма сквозной визуализации. Интерактивные графики строятся с использованием библиотеки Plotly.js [8, с. 59]. Задача динамической генерации расчетных LaTeX-формул на каждом этапе вывода возложена на библиотеку MathJax [9, с. 488].

Работа инструмента иллюстрируется на примере задачи управления системой охлаждения. На рис. 1 представлена конфигурация системы, включающая определение лингвистических переменных [10, с. 37] и формирование логики в виде базы правил. На рис. 2 показан процесс вывода для конкретных входных значений. Поэтапно продемонстрирован расчет степеней принадлежности в ходе фаззификации и финальный результат дефаззификации в виде значения, отмеченного на графике агрегированной функции.

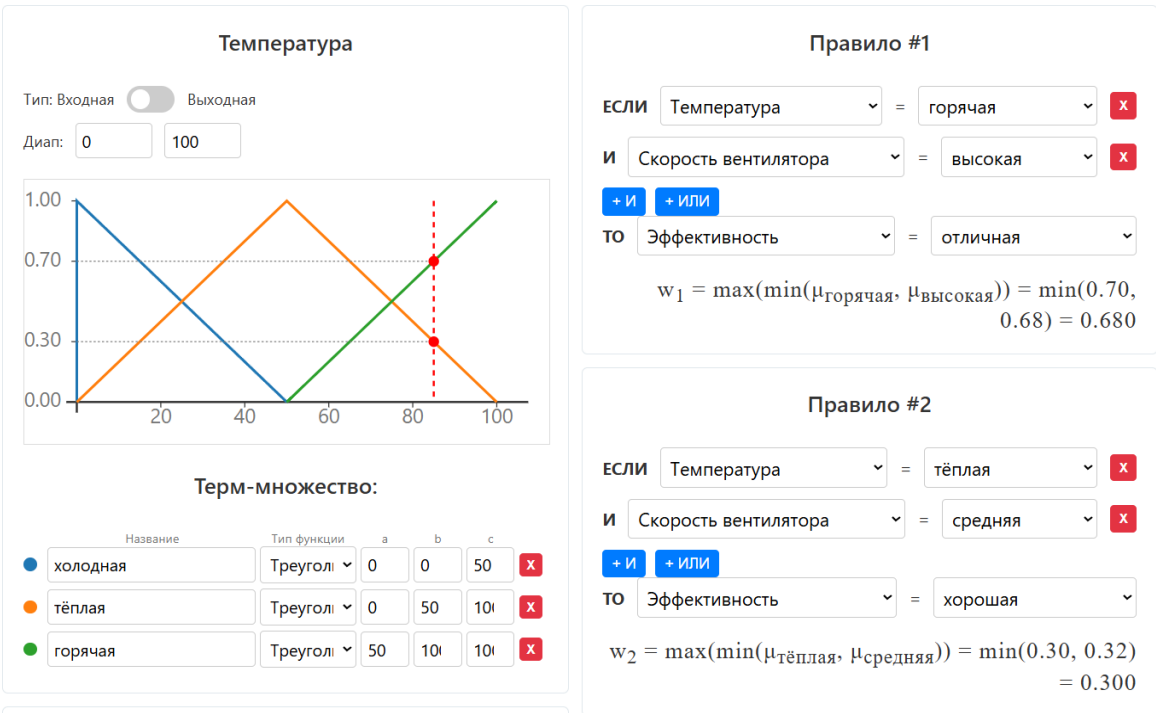


Рис. 1. Интерфейс с отображением входных переменных и нечетких правил

ВЫВОДЫ

Разработанная интерактивная веб-среда предназначена для моделирования и визуализации систем нечеткого вывода и обеспечивает детальное

отслеживание всех этапов вычислений в реальном времени, включая автоматическую генерацию соответствующих математических формул. Это позволяет повысить прозрачность и интерпретируемость абстрактных моделей. Область ее применения включает образовательный процесс, а также разработку и отладку прототипов. Перспективы дальнейшего развития работы предполагают реализацию модели Такаги – Сугено и интеграцию различных методов дефаззификации.

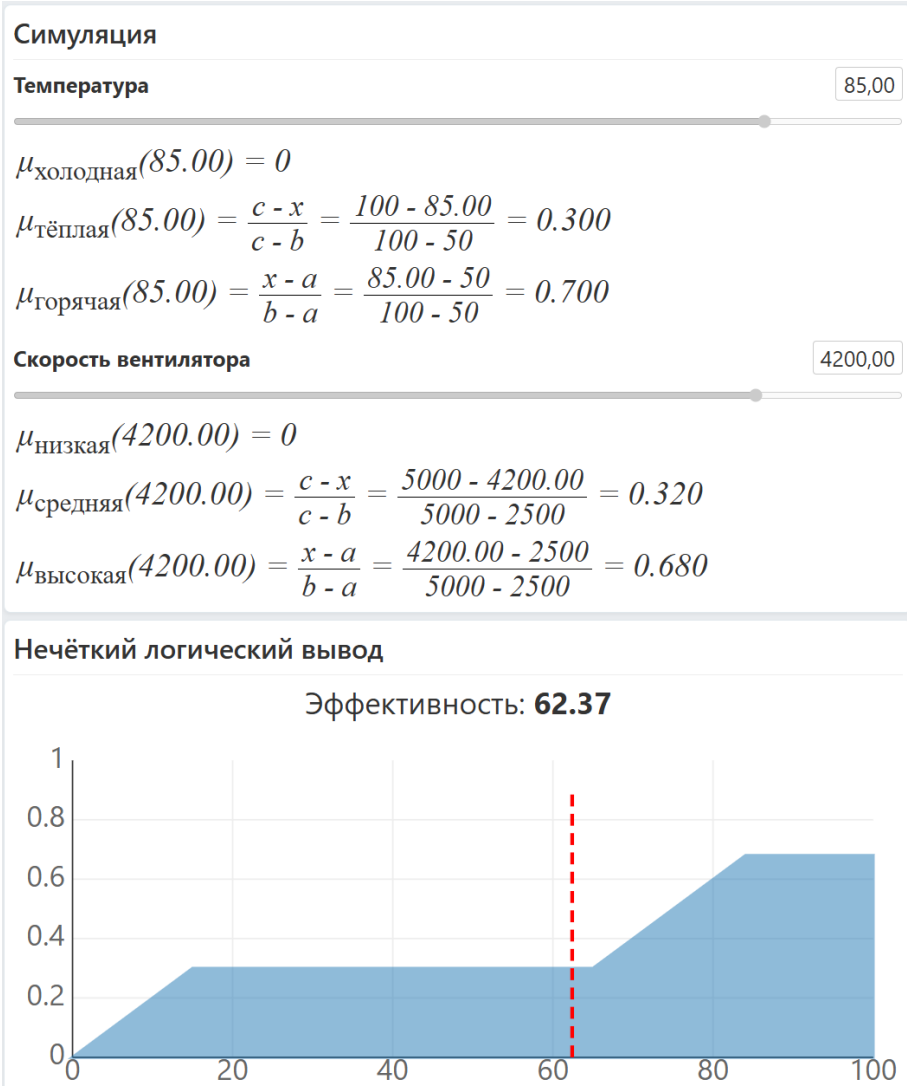


Рис. 2. Интерфейс инструмента в процессе моделирования системы

Список источников

1. Сорокин А. В., Гаврилова С. В. Возможности использования нечеткой логики в управлении технологическими процессами // Научный лидер. 2024. № 22. URL: <https://scilead.ru/article/6621-vozmozhnosti-ispolzovaniya-nechetkoj-logiki-v> (дата обращения: 25.11.2026).

2. Флегонтов А. В., Вилков В. Б., Черных А. К. Моделирование задач принятия решений при нечетких исходных данных : монография. Санкт-Петербург : Лань, 2020. 332 с. ISBN 978-5-8114-4402-1.
3. Сидорин В. В. Оценка проекта на основе теории нечетких множеств и концепции нечеткой логики: метод и методика // Russian Technological Journal. 2025. Т. 13, № 5. С. 119–132.
4. Васин Н. Н., Какабьян К. С. Применение адаптивной нейро-нечеткой системы вывода для обнаружения DDoS-атак на основе набора данных CIC-DDoS-2019 // Труды учебных заведений связи. 2025. Т. 11, № 3. С. 87–96.
5. Неупокоева Е. О., Малыгина С. Н., Быстров В. В. Практика применения нечеткой логики для имитационного моделирования сложных систем. DOI: 10.37614/2949.1215.2024.15.3.006 // Труды Кольского научного центра РАН. 2024. Т. 15, № 3. С. 69–81.
6. Мансурова М. Я. Роль методов нечеткой логики в процессе оценки эффективности бизнес-процессов. DOI: 10.70769/3030-3214.SRT.2.4.2024.55 // Цифровые технологии в промышленности. 2024. Т. 2, № 4. С. 95–103.
7. Применение алгоритма нечеткой логики Мамдани для оценки качества моделей искусственного интеллекта на основе имеющихся данных / С. Т. Дусакаева [и др.]. DOI: 10.26731/1813-9108.2023.1(77).170-180 // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 1 (77). С. 170–180.
8. Титов А. Н., Тазиева Р. Ф. Интерактивная визуализация данных. Работа с библиотекой Plotly : учебно-методическое пособие. Казань : КНИТУ, 2023. 136 с. ISBN: 978-5-7882-3387-1.
9. Лонг Д. Д., Титор П. Р. Книга рецептов: проверенные рецепты для статистики, анализа и визуализации данных : руководство / пер. с англ. Д. А. Беликова. Москва : ДМК Пресс, 2020. 510 с. ISBN: 978-5-97060-835-7.
10. Коханова В. С. Аппарат нечеткой логики как инструмент оценки эффективности цифровизации компании. DOI: 10.26425/1816-4277-2021-2-36-41 // Вестник университета. 2021. № 2. С. 36–41.

**КОМПЕНСАЦИЯ ПОТЕРЬ НИЗКОЧАСТОТНЫХ
СОСТАВЛЯЮЩИХ ИМПУЛЬСНЫХ СИГНАЛОВ
ПРИ ЧИСЛЕННОМ СПЕКТРАЛЬНОМ АНАЛИЗЕ**

КОНОНОВ Александр Андреевич, аспирант
Воронежский государственный университет
394018, Россия, Воронеж, kononov@phys.vsu.ru

ВЕЛИЧКИНА Анастасия Сергеевна, аспирант
Воронежский государственный университет
394018, Россия, Воронеж, nastyavelichkina65@gmail.com

УСКОВ Григорий Константинович,
доктор физико-математических наук,
профессор, заведующий кафедрой электроники
Воронежский государственный университет
394018, Россия, Воронеж, uskov@phys.vsu.ru

Аннотация. В статье рассматриваются и сравниваются искажения формы импульсного сигнала, вызванные ограничениями частотного диапазона при спектральной обработке. Показано, что наиболее существенна потеря низкочастотных компонент спектра, и предложен метод ее компенсации.

Ключевые слова: компенсация искажений, спектральный анализ, частотный диапазон, оценка импульсов.

**COMPENSATION FOR LOSS OF LOW-FREQUENCY
CONTENT OF PULSE SIGNALS
IN NUMERICAL SPECTRAL ANALYSIS**

KONONOV Aleksandr Andreevich, PhD student
Voronezh State University
394018, Russia, Voronezh, kononov@phys.vsu.ru

VELICHKINA Anastasia Sergeevna, PhD student
Voronezh State University
394018, Russia, Voronezh, nastyavelichkina65@gmail.com

USKOV Grigoriy Konstantinovich,
Doctor of Physical and Mathematical Sciences,
Professor, Head at the Department of Electronics

Abstract. The article discusses and compares the impulse signal shape distortions caused by the frequency range limitations during spectral processing. It is shown that the loss of low-frequency spectrum components is the most significant, and a method for its compensation is proposed.

Keywords: distortion compensation, spectral analysis, frequency range, pulse estimation.

ВВЕДЕНИЕ

Сверхширокополосные импульсные сигналы имеют большое значение во многих современных радиотехнических системах, охватывающих весьма широкий круг практических применений [1, 2]. Теоретический анализ соответствующих моделей нередко оказывается достаточно сложной задачей: непосредственное исследование во временной области, как правило, затруднительно, вследствие чего важным инструментом становится моделирование процессов в частотном представлении с последующим взятием обратного преобразования Фурье. На практике при этом, однако, часто приходится выполнять расчеты численно, для значений частоты, лежащих в пределах некоторого ограниченного диапазона.

Вид самого импульсного сигнала при таком подходе восстанавливается по тем спектральным отсчетам, которые в итоге имеются в распоряжении. Если они не покрывают полностью всю наиболее существенную часть спектра импульса, то его форма будет искажена. Целью настоящей работы было исследование вопроса о том, какие из подобных искажений влияют заметнее; как будет показано далее, наиболее существенным оказывается ограничение частотного диапазона снизу. Также предложен относительно простой способ частичной компенсации указанных искажений с помощью некоторых вспомогательных вычислений.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Итак, рассмотрим для определенности (и большей наглядности) идеализированный импульсный сигнал длительности τ :

$$s(t) = \begin{cases} 1, & |t| \leq \tau/2, \\ 0, & |t| > \tau/2. \end{cases} \quad (1)$$

Спектр такого сигнала, как известно, выражается через функцию отсчетов:

$$\dot{S}(\omega) = \tau \cdot \text{sinc} \frac{\tau\omega}{2}. \quad (2)$$

Если ограничить частоты сверху значением ω_1 , что соответствует преобразованию типа ФНЧ (low-pass, LP), обратное преобразование Фурье даст

$$s_{LP}(t, \omega_1) = \frac{1}{\pi} \left(\text{Si} \frac{(2t + \tau)\omega_1}{2} - \text{Si} \frac{(2t - \tau)\omega_1}{2} \right), \quad (3)$$

где используется определение для интегрального синуса:

$$\text{Si } z = \int_0^z \frac{\sin t}{t} dt. \quad (4)$$

Аналогично, ограничение частот снизу значением ω_0 приводит к замене исходного сигнала $s(t)$ на «обработанный ФВЧ» (high-pass, HP) сигнал

$$s_{HP}(t, \omega_0) = s(t) - s_{LP}(t, \omega_0). \quad (5)$$

Наконец, оба ограничения одновременно дают эффект, соответствующий «полосовой фильтрации» (band-pass, BP), придавая импульсу вид

$$s_{BP}(t, \omega_0, \omega_1) = s_{LP}(t, \omega_1) - s_{LP}(t, \omega_0). \quad (6)$$

На рис. 1 показан пример влияния разных ограничений на исходный сигнал.

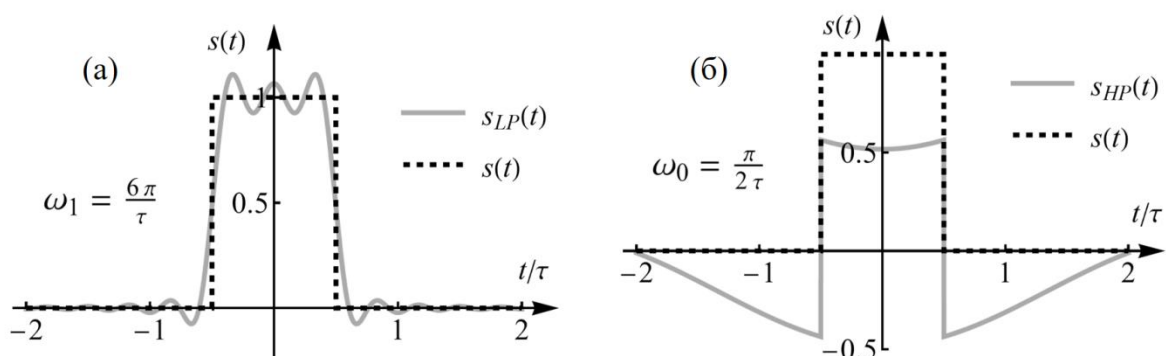


Рис. 1. Влияние ограничения частотного диапазона: а) сверху б) снизу

Как можно видеть, ограничение частотного диапазона сверху приводит к появлению во временной области флуктуаций, напоминающих т. н. явление

Гиббса, известное в теории рядов Фурье, в то время как потеря низкочастотных составляющих вызывает существенные изменения в максимальной амплитуде и фронтах сигнала. Для их компенсации можно приближенно возместить потерю низкочастотных компонент спектра посредством аддитивной поправки

$$\Delta\dot{S}(\omega) = \begin{cases} \dot{S}(\omega_0), & |\omega| \leq \omega_0 \\ 0, & |\omega| > \omega_0 \end{cases} \Leftrightarrow \Delta s(t) = |\dot{S}(\omega_0)| \frac{\omega_0}{\pi} \text{sinc}(t\omega_0). \quad (7)$$

Эффект этой операции показан на рис. 2, где видно, что фронты и амплитуда сигнала становятся значительно ближе к исходным.

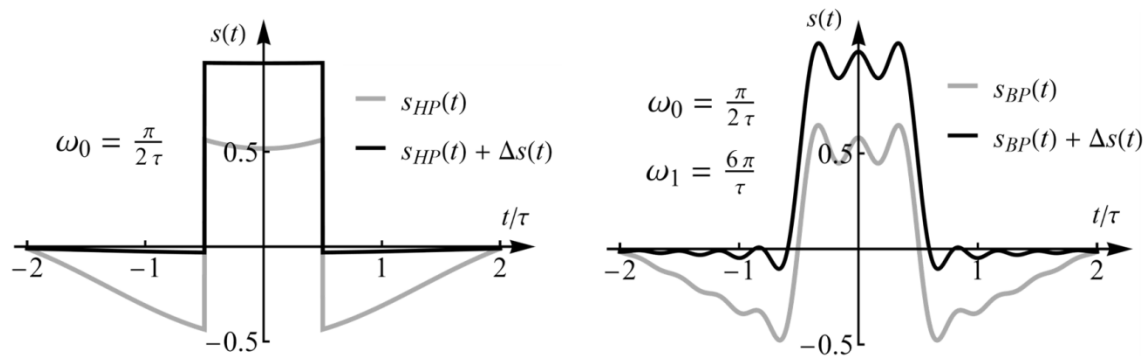


Рис. 2. Примеры компенсации потери низкочастотных компонент

ВЫВОДЫ

В работе было проведено исследование искажений импульсного сигнала, возникающих в результате ограничения его обрабатываемой части спектра. Как показал анализ, наиболее существенно на форму импульса влияет ограничение рабочего диапазона частот снизу. Далее был предложен метод компенсации подобных ошибок с помощью некоторых дополнительных вычислений, основывающихся на использовании уже имеющихся в распоряжении данных. На конкретном примере показано, что изложенный способ действительно помогает восстановить форму импульса, в частности, корректируя искажения его фронтов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-19-00891, <https://rscf.ru/project/24-19-00891/>. Для выполнения численных расчетов в работе использовалось оборудование учебно-научного дизайн-центра проектирования радиоэлектронных систем СВЧ, терагерцового и оптического диапазонов на отечественной электронной компонентной базе ФГБОУ ВО

«ВГУ» в рамках реализации федерального проекта «Подготовка кадров и научного фундамента для электронной промышленности».

Список источников

1. Zhou Yuan, Law Choi Look, Xia Jingjing. Ultra low-power UWB-RFID system for precise location-aware applications. DOI: 10.1109/WCNCW.2012.6215480 // 2012 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW). 2012. P. 154–158.
2. Kshetrimayum R. S. An introduction to UWB communication systems. DOI: 10.1109/MPOT.2009.931847 // IEEE Potentials. 2009. Vol. 28, no. 2. P. 9–13.
3. Vishwakarma M., Harikrishna A. High Amplitude sharp pulse Generation using Step recovery diode for Radar Applications. DOI: 10.1109/IMaRC45935.2019.9118740 // 2019 IEEE MTT-S International Microwave and RF Conference (IMARC). Mumbai, India, 2019. P. 1–4.
4. 10-kV 4H-SiC Drift Step Recovery Diodes (DSRDs) for Compact High-repetition Rate Nanosecond HV Pulse Generator / Sun R. et al. DOI: 10.1109/ISPSD46842.2020.9170132 // 32nd International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD). Vienna, Austria, 2020. P. 62–65.

ОСОБЕННОСТИ ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО МНОЖИТЕЛЯ ДЛЯ СФЕРИЧЕСКОЙ АПЕРТУРНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

КОНОНОВ Александр Андреевич, аспирант
Воронежский государственный университет
394018, Россия, Воронеж, kononov@phys.vsu.ru

УСКОВ Григорий Константинович,
доктор физико-математических наук,
профессор, заведующий кафедрой электроники
Воронежский государственный университет
394018, Россия, Воронеж, uskov@phys.vsu.ru

Аннотация. В работе обсуждается вопрос об особенностях поляризационного множителя для неплоских апертур на примере сферической поверхности. На основе точного решения соответствующей электродинамической задачи показано, что при определенных условиях распространение волн в окружающем апертуру пространстве является не вполне прямолинейным, а включает в себя также нетривиальные дифракционные эффекты. Приведены примеры характеристик направленности излучения элементарного участка сферической апертуры для разных соотношений между ее диаметром и длиной волны.

Ключевые слова: поляризационный множитель, неплоская апертура, сферическая поверхность.

FEATURES OF THE POLARIZATION FACTOR FOR A SPHERICAL APERTURE SURFACE

KONONOV Aleksandr Andreevich, PhD student
Voronezh State University
394018, Russia, Voronezh, kononov@phys.vsu.ru

USKOV Grigoriy Konstantinovich,
Doctor of Physical and Mathematical Sciences,
Professor, Head at the Department of Electronics
Voronezh State University
394018, Russia, Voronezh, uskov@phys.vsu.ru

Abstract. The paper discusses the polarization factor features for non-planar apertures on the example of a spherical surface. Based on the exact solution of the corresponding electrodynamic problem, it is shown that under certain conditions, the waves propagation in the space surrounding the aperture is not entirely rectilinear, but also includes non-trivial diffraction effects. Examples of the radiation directivity characteristics for an elementary fragment of a spherical aperture are given for different ratios between its diameter and the wavelength.

Keywords: polarization factor; non-planar aperture; spherical surface.

ВВЕДЕНИЕ

Апертурная теория является значимым инструментом исследования электромагнитных полей излучения различных радиотехнических устройств (в особенности относящихся к сверхширокополосному диапазону [1–7]). Расчётные соотношения при этом основываются на интегральных формулах, содержащих т. н. поляризационный множитель [7, 8], который характеризует вклад каждого элементарного участка апертуры.

В рамках квазигеометрического приближения (когда распространение волн предполагается строго прямолинейным) интегрирование ведётся только по непосредственно видимой из $\vec{r}$ части S_a , ограниченной горизонтом на апертуре [8]. В настоящей работе исследуется полученное с помощью методов математической физики точное (т. е. лишенное всяких приближений) решение аналогичной задачи для случая сферической апертурной поверхности; интеграл при этом охватывает ее целиком, а степень вклада частей, находящихся (относительно выбранной точки наблюдения) «за горизонтом», будет исследована на основе точного выражения для поляризационного множителя.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Итак, для расчета поля $\vec{E}$ в точке наблюдения $\vec{r}$ с помощью апертурной теории применяются выражения вида

$$\vec{E}(\vec{r}) = \frac{ik}{2\pi} \iint_{S_a} \vec{E}(\vec{r}_a) \dot{\alpha}(\vec{r}, \vec{r}_a) \frac{e^{-ikR}}{R} dS_a, \quad R = |\vec{r} - \vec{r}_a|, \quad (1)$$

где k – волновое число на рассматриваемой частоте;

$\vec{r}_a$ – точка интегрирования по апертурной поверхности S_a ;

$\dot{\alpha}(\vec{r}, \vec{r}_a)$ – поляризационный множитель, характеризующий особенности вклада каждого элементарного участка dS_a в результирующую величину $\dot{E}$, учитывая сразу зависимости и от расстояния, и от направления.

Для сферической апертуры радиуса R_a точное решение соответствующей внешней краевой задачи для волнового уравнения Гельмгольца приводит к следующему явному (хоть и несколько громоздкому) выражению [8]:

$$\dot{\alpha}(\vec{r}, \vec{r}_a) = \frac{2\pi}{ik\sqrt{R_a r}} \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=-l}^m \frac{\mathcal{H}_{l+\frac{1}{2}}^{(2)}(kr)}{\mathcal{H}_{l+\frac{1}{2}}^{(2)}(kR_a)} \cdot \frac{y_l^m(\theta, \varphi)(y_l^m(\theta_a, \varphi_a))^*}{\|y_l^m\|^2} \cdot \frac{R}{R_a} e^{ikR}, \quad (2)$$

где $\mathcal{H}_\nu^{(2)}$ – функция Ханкеля 2-го рода порядка ν ;

y_l^m – сферическая функция с индексами l и m .

В качестве иллюстрации на рис. 1 приведены примеры графиков распределения величины $\text{Re } \dot{E}(\vec{r})$ вблизи апертуры (на расстоянии, соизмеримом с R_a), построенные по результатам численных расчетов (сумма в (2) вычислялась до $l = 60$) в предположении, что излучает только малый участок, расположенный в окрестности верхнего полюса. Как видно, поле может оставаться ненулевым и в областях, выходящих за пределы зоны непосредственной видимости указанного участка (в данном случае это была бы верхняя полуплоскость).

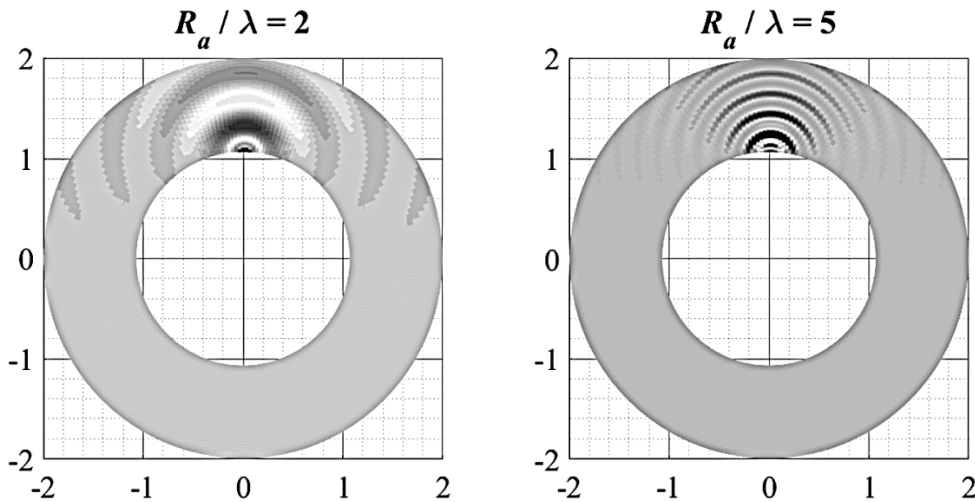


Рис. 1. Примеры распределения поля малого участка сферической апертуры

Графики зависимости $|\dot{\alpha}(\vec{r}, \vec{r}_a)|$ от угла излучения при фиксированных расстояниях r от точки наблюдения до центра сферы показаны на рис. 2. Видно, что с отдалением от S_a эскиз «диаграммы направленности элементарного участка» становится шире; при больших длинах волн λ в ней даже появляются задние лепестки (это совпадает с качественным представлением о способности длинных волн огибать препятствия путем дифракции). Более того, в этом же (низкочастотном) случае форма графика вблизи апертуры не только сужена, но и усилена по амплитуде; это объясняется дополнительным вкладом в величину поля слагаемых ближней зоны, которые убывают пропорционально высшим степеням $1/(kr)$ и, следовательно, дольше остаются существенными при низких частотах.

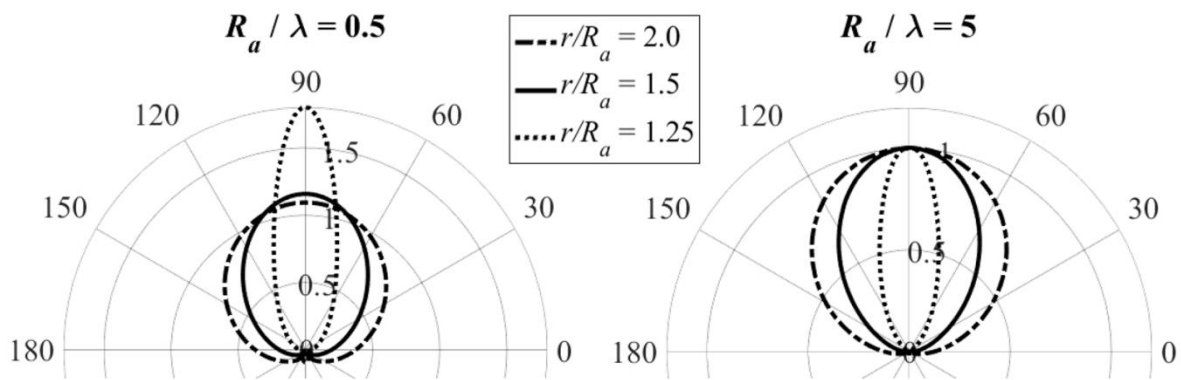


Рис. 2. Примеры характеристики направленности поляризационного множителя

ВЫВОДЫ

В работе исследованы нюансы, связанные с поляризационным множителем сферической апертурной поверхности. На основе точного аналитического расчетного соотношения установлено, что излучение элементарного участка подобной неплоской апертуры не ограничивается пределами области непосредственной геометрической видимости. Получены количественные зависимости поляризационного множителя от угла и направления излучения в ближней зоне, подтверждающие качественные гипотезы о явлениях дифракционной природы.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-19-00891, <https://rscf.ru/project/24-19-00891/>. Для выполнения численных расчетов в работе использовалось оборудование учебно-научного дизайн-центра проектирования радиоэлектронных систем СВЧ, терагерцового и оптического

диапазонов на отечественной электронной компонентной базе ФГБОУ ВО «ВГУ» в рамках реализации федерального проекта «Подготовка кадров и научного фундамента для электронной промышленности».

Список источников

1. Bruton L. T., Premaratne S., Agathoklis P. On the Dynamical Response of the Ideal Paraboloidal Reflector. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3137747 // IEEE Access. 2022. Vol. 10. P. 6899–6908.
2. Skulkin S. P., Turchin V. I. Transient Far-Fields of Offset Reflector Antenna. DOI: 10.1109/APS.2001.958911 // IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. Digest. Boston, MA, USA, 2001. Vol. 1. P. 546–549.
3. Скулкин С. П., Турчин В. И. Импульсное поле офсетной параболической антенны в дальней зоне // Антенны. 2009. № 6 (145). С. 3–8.
4. Скулкин С. П., Турчин В. И. Расчет импульсного поля офсетной рефлекторной антенны в ближней зоне // Антенны. 2009. № 8 (147). С. 56–59.
5. Skulkin S. P., Turchin V. I. Time-domain Far Fields of Reflector Antennas. DOI: 10.1109/APS.1997.631862 // IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. Digest. Montreal, QC, Canada, 1997. Vol. 2. P. 1414–1416.
6. Skulkin S. P., Turchin V. I. Transient Field Calculation of Aperture Antennas. DOI: 10.1109/8.774158 // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1999. Vol. 47, no. 5. P. 929–932.
7. Transient Field Calculation of Aperture Antennas for Various Field Distributions over the Aperture / Skulkin S. P., Turchin V. I., Kascheev N. I., Ponomarev D. M. DOI: 10.1109/LAWP.2017.2715323 // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2017. Vol. 16. P. 2295–2298.
8. Кононов А. А., Усков Г. К. Применение теоретического метода расчета монохроматического поля излучения неплоской поверхности на примере сферы // Радиолокация, навигация связь : сб. тр. XXXI Междунар. науч.-техн. конф. В 6 т. Т. 4. Воронеж : Изд-во ВГУ, 2025. С. 131–139.

ОПТИМАЛЬНОСТЬ АЛГОРИТМА РАЗЛИЧЕНИЯ СИГНАЛОВ В СИСТЕМЕ LORA

КОРЧАГИН Юрий Эдуардович, доктор физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой «Радиофизика»
Воронежский государственный университет
394018, Россия, Воронеж, korchagin@phys.vsu.ru

НАЗАРЕНКО Богдан Эдуардович, аспирант
Воронежский государственный университет
394018, Россия, Воронеж, nazarenko@phys.vsu.ru

Аннотация. В работе рассматривается влияние параметров ЛЧМ сигнала с модуляцией LoRa на алгоритм оптимального приема. Аналитически обоснована необходимость обеспечения зависимости между длительностью импульса, полосой частот и фактором расширения спектра для обеспечения оптимального приема. Полученные результаты могут быть использованы для исследования построения приемника LoRa при нарушении оптимальности.

Ключевые слова: линейно-частотная модуляция, LoRa, оптимальный прием.

OPTIMAL LORA SIGNAL DETECTION ALGORITHM

KORCHAGIN Yuri Eduardovich,
Doctor of Physical and Mathematical Sciences,
Associate Professor, head at the Department of «Radiophysics»
Voronezh State University
394018, Russia, Voronezh, korchagin@phys.vsu.ru

NAZARENKO Bogdan Eduardovich, PhD student
Voronezh State University
394018, Russia, Voronezh, nazarenko@phys.vsu.ru

Abstract. In this paper, we consider the influence of the parameters of the LoRa-modulated LCM signal on the optimal reception algorithm. We analytically justified the need to ensure a relationship between pulse duration, frequency band, and spread spectrum factor to ensure optimal reception. The results obtained can be used to study the construction of a LoRa receiver when optimality is violated.

Keywords: chirp-spreading spectrum, LoRa, optimal receiver.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы можно наблюдать активный рост количества устройств для интернета вещей. Все больше таких устройств использует ЛЧМ модуляцию LoRa ввиду малого энергопотребления и большой дальности [1]. В связи с этим появляется все больше технических реализаций LoRa в зависимости от требований к конкретному устройству [2, 3]. При этом ввиду технических ограничений точность настройки параметров генерируемого сигнала для каждой реализации будет отличаться. В таком случае особый интерес представляет влияние неточности задания основных параметров сигнала LoRa на характеристики приема [4]. Известно, что смещение частоты сигнала или длительности импульса влияет на ортогональность импульсов [5] и может привести к значительному ухудшению характеристик приема [6]. Однако вначале требуется установить условия, связывающие между собой длительность импульса T , ширину спектра Δf и фактор расширения спектра SF и обеспечивающие оптимальность алгоритмов различения LoRa сигналов.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Рассмотрим ЧМ сигнал с центральной частотой f_0

$$c_{S_n}(t) = A_0 \cos \left(2\pi f_0 t + 2\pi \int_0^t f_{S_n}(\tau) d\tau \right), \quad (1)$$

где $f_{S_n}(t)$ – кусочно-линейная функция, описывающая изменение частоты в зависимости от номера канального символа (сигнала) S_n

$$f_{S_n}(t) = \begin{cases} -\frac{\Delta f}{2} + \frac{\Delta f}{M} S_n + \frac{\Delta f}{T} t, & 0 \leq t \leq T_w, \\ -\frac{3\Delta f}{2} + \frac{\Delta f}{M} S_n + \frac{\Delta f}{T} t, & T_w \leq t \leq T, \end{cases}$$

где Δf – полоса частот, $M = 2^{SF}$, SF – фактор расширения спектра (в стандарте LoRa установлен диапазон $SF = 7 \dots 12$), $T_w = T(1 - S_n/M)$ – точка разрыва функции частоты, $S_n = \overline{1, M}$, M – количество различаемых символов.

Из выражения для функции частоты видно, что итоговый сигнал представляет собой ЛЧМ импульс, где точка начала функции частоты определяет передаваемый символ S_n . В приближении относительной узкополосности достаточно рассмотреть низкочастотные составляющие. В этом случае приемник проектируется для комплексного сигнала

$$\dot{x}_{S_n}(t) = A_0 \exp \left[j2\pi \int_0^t f_{S_n}(t) dt \right]$$

и реализует алгоритм оптимального различения, основой которого является формирование в качестве решающей статистики корреляционного интеграла

$$L(S_n) = \int_0^T \dot{r}(t) \dot{x}_{S_n}^*(t) dt = \frac{1}{A_0^2} \int_0^T \dot{r}(t) \dot{x}_{S_0}^*(t) \dot{x}_{S_n}^*(t) \dot{x}_{S_0}(t) dt = \int_0^T \dot{R}(t) \dot{d}_{S_n}^*(t) dt, \quad (2)$$

где обозначено $\dot{r}(t) = \dot{x}_{S_n}^*(t) + \dot{n}(t)$ – наблюдаемая реализация аддитивной смеси сигнала $\dot{x}_{S_n}^*(t)$ и комплексного гауссовского белого шума $\dot{n}(t)$,

$$\dot{d}_{S_n}(t) = \frac{1}{A_0} \dot{x}_{S_n}(t) \dot{x}_{S_0}^*(t), \quad \dot{R}(t) = \dot{r}(t) \dot{x}_{S_0}^*(t).$$

Поскольку в стандарте LoRa используется дискретная обработка, введем дискретизацию по времени $t = Tk/N$, $k = 1 \dots N$. Ввиду того, что функция $f_{S_n}(t)$ имеет разрыв в точке T_w , должно выполняться условие $N = \mu M$, где μ – целое число. В этом случае решающая статистика (2) принимает вид:

$$L(S_n) = TA_0 \sum_{k=0}^{\mu(M-S_n)} \dot{R}_k \exp \left[-j2\pi \frac{\Delta f T}{M} \frac{S_n}{M} \frac{k}{\mu} \right] + \\ + TA_0 \sum_{k=\mu(M-S_n)}^{\mu M} \dot{R}_k \exp \left[-j2\pi \frac{\Delta f T}{M} \frac{S_n}{M} \frac{k}{\mu} \right] \exp \left[-j2\pi \frac{\Delta f T}{M} \left(M - S_n - \frac{k}{\mu} \right) \right]. \quad (3)$$

Оптимальный приемник должен формировать корреляционный интеграл (3) для всех возможных значений $S_n = \overline{1, M}$ и выносить решение в пользу сигнала с наибольшим значением $L(S_n)$. Однако в реально действующих устройствах LoRa вычисления по формуле (3) сведены к вычислению ДПФ. Для перехода от выражения (3) к ДПФ достаточно, чтобы выполнялось условие

$$\frac{\Delta f T}{M} \left(M - S_n - \frac{k}{\mu} \right) \in \mathbb{Z}. \quad (4)$$

Оно накладывает ограничение на величины Δf , T и μ и устанавливает взаимосвязь между ними. Таким образом, вводится требование $T\Delta f = M$, установленное в стандарте LoRa. Помимо этого, поскольку данное условие должно выполняться для любого k , также выводится требование $\mu = 1$. Решающая статистика (2) в этом случае принимает вид

$$L(S_n) = TA_0 \sum_{k=0}^M \dot{R}_k e^{-j2\pi \frac{S_n k}{M}}, \quad (5)$$

что совпадает с определением ДПФ.

Стоит отметить, что в общем случае требование к $T\Delta f = M$ будет иметь вид $T\Delta f = \alpha M$, (α – целое), поскольку для приведения корреляции к ДПФ достаточно кратности M . Можно предположить, что в результате был сделан выбор в пользу $\alpha = 1$ для сокращения количества параметров и использования минимально возможных значений T и Δf .

Неточность задания параметров Δf , T и μ на приемной стороне приводит к нарушению условия (4), и решающая статистика (5), выраженная через ДПФ, приводит к неоптимальному построению приемного устройства. В результате этого снижается вероятность правильного различения, величина которого требует дополнительных исследований.

ВЫВОДЫ

Рассмотренный процесс построения оптимального приемника показывает, что связь между длительностью импульса, полосой частот и количеством символов носит фундаментальный характер для осуществления оптимального приема. Поскольку стандарт LoRa использует ДПФ для определения принятого символа, то любое отклонение от данного условия сделает приемник не оптимальным. В этом случае разработка такого приемника потребует дополнительного исследования.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-19-00891, <https://rscf.ru/project/24-19-00891/>.

Список источников

1. Звонарев В. А., Колосков В. Ю., Равина А. А. Основные принципы разработки программного комплекса, основанного на технологии LoRa для систем «Интернет вещей» // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 9. С. 360–362.
2. Болдина В. И., Фролов А. А. Современная сверхзкополосная система передачи данных «на кристалле» LoRa // Телекоммуникации и информационные технологии. 2017. Т. 4, № 2. С. 5–9.
3. Демченко Л. А., Сергеев А. С. Анализ характеристик и применимости модулей NRF24L01 и LORA E32-433T30D с использованием ARDUINO UNO // Морской вестник. 2025. № 3 (95). С. 88-91.
4. Коваленко О. Н. Исследование влияния скорости кода и коэффициента расширения спектра на параметры сети Lora // Региональные проблемы устойчивого развития агропромышленного комплекса в условиях цифровой трансформации : сборник статей Международной научно-практической конференции. Пенза : Пензенский государственный аграрный университет. 2024. С. 52–55.
5. Impact of LoRa Imperfect Orthogonality: Analysis of Link-Level Performance / Croce D. et al. DOI: 10.1109/LCOMM.2018.2797057 // IEEE Communications Letters. 2018. Vol. 22, No. 4. P. 796–799.
6. Коваленко О. Н. Оценка влияния параметров оборудования Lora на эффективную скорость передачи // Актуальные вопросы современной науки и практики : сборник научных статей по материалам XV Международной научно-практической конференции. Уфа : НИЦ Вестник науки, 2024. С. 47–50.

РЕЗУЛЬТАТЫ ВЕРТИКАЛЬНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРНОГО КВ КАНАЛА

КОРЧАГИН Юрий Эдуардович, доктор физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой «Радиофизика»
Воронежский государственный университет
394018, Россия, Воронеж, korchagin@phys.vsu.ru

ДОРОШЕНКО Василий Юрьевич, руководитель программ
АО «Концерн «Созвездие»
394018, Россия, Воронеж, goodvy@bk.ru

ЧЕБОТАРЕВ Андрей Андреевич, аспирант
Воронежский государственный университет
394018, Россия, Воронеж, wizi48wizi@gmail.com

Аннотация. Выполнено экспериментальное измерение импульсной характеристики и функции рассеяния широкополосного ионосферного КВ канала NVIS в осенний период 2024 года. Исследовано влияние узкополосных помех, попадающих в диапазон частот исследуемого канала. Показана возможность задания значений параметров для модели Воглера-Хофмайера на основе результатов эксперимента.

Ключевые слова: квазизенитное падение, радиосигнал, ионосферный КВ канал, согласованный фильтр, импульсная характеристика, функция рассеяния.

VERTICAL SENSING RESULTS IONOSPHERIC HF CHANNEL

KORCHAGIN Yury Eduardovich, Doctor of Physico-Mathematical Sciences, Associate Professor, Head at the Department of «Radiophysics»
Voronezh State University
394018, Russia, Voronezh, korchagin@phys.vsu.ru

DOROSHENKO Vasiliy Yurevich, program manager
JSC Concern Sozvezdie
394018, Russia, Voronezh, goodvy@bk.ru

CHEBOTAREV Andrey Andreevich, PhD student
Voronezh State University
394018, Russia, Voronezh, wizi48wizi@gmail.com

Abstract. An experimental measurement of the impulse response and scattering function of the broadband ionospheric HF channel NVIS was performed in the autumn of 2024. The effect of narrowband interference falling within the frequency range of the studied channel is investigated. The possibility of setting parameter values for the Vogler-Hofmeier model based on experimental results is shown.

Keywords: NVIS, radio signal, ionospheric HF channel, matched filter, impulse response, scattering function.

ВВЕДЕНИЕ

Традиционно для задач радиосвязи в КВ диапазоне, в том числе в каналах с отражением от ионосферы, используют узкополосные сигналы. Однако в последние годы возрос интерес научного и инженерного сообщества к вопросам применения более широкополосных КВ сигналов в ионосферном канале. Особенно актуально исследование прохождения широкополосных сигналов в условиях квазизенитного распространения (в англоязычной литературе Near Vertical Incidence Skywave, NVIS). Процесс распространения радиоволны в ионосфере сопровождается целым комплексом физических явлений, однако для построения систем связи наиболее важным является построение модели КВ канала. Какая бы модель ни была выбрана, она нуждается в задании параметров, либо измеренных экспериментально, либо выбранных из иных соображений. Вполне понятно, что измеренные параметры имеют сильную зависимость от времени суток и времени года. В данной работе выполнено экспериментальное исследование, которое заключается в зондировании ионосферного канала тестовым пилотным ЛЧМ импульсом с последующей обработкой принятого сигнала с целью найти импульсные характеристики (ИХ) и функции рассеяния КВ канала NVIS. Следует отметить, что зондирование ионосферы проводится многими коллективами достаточно давно с целью получения информации о ее состоянии. В данной работе была поставлена цель исследования характеристик КВ канала между передатчиком и приемником, а также освоение методики быстрого получения экспериментальных характеристик КВ NVIS канала с точки зрения теории связи для дальнейшего использования в соответствующих программных моделях.

РЕЗУЛЬТАТЫ.

Эксперимент проводился 4 октября 2024 г. на двух передвижных испытательных лабораториях на трассах длиной 75, 86, 140, 154 км в дневное и вечернее время на частотах 3–12 МГц с сигналом с полосой 12, 100, 300 МГц при приеме сигнала на SDR приемник. Передающий тракт состоял из следующих элементов (рис. 1): генератор ЛЧМ сигнала на базе SDR HackRF One, преселектор для предварительной фильтрации и предусиления, усилитель мощности (УМ) 100 Вт, антенно-согласующее устройство (АСУ), рамочная антенна зенитного излучения (РАЗИ).

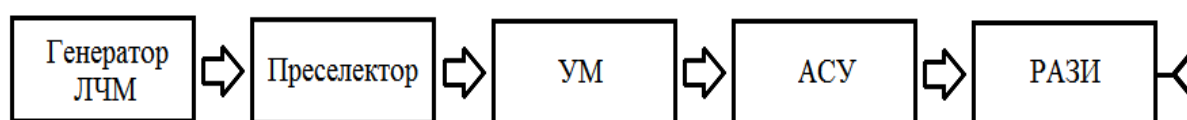


Рис. 1. Блок-схема передающего тракта

Прием осуществлялся на SDR WinRadio Excalibur, а также с помощью любительского SDR приемника в г. Тамбове (на доступных для него частотах). Принятая реализация поступала на квадратурный смеситель, фильтровалась полосовым фильтром, согласованным с ЛЧМ сигналом (10, 100, 300 кГц). Выходной сигнал согласованного фильтра далее поступал на алгоритм обработки и синхронизации, для построения характеристик ионосферного канала.

Частота сигнала выбиралась исходя из доступности канала на текущее время. Передача производилась пачками сигналов с ЛЧМ длительностью 42мс, на частоте 11,96МГц без задержек между импульсами и общей длительности до 5 минут. Эксперимент проводился с 15:00 до 22:00 по московскому времени. По завершении эксперимента была проведена обработка принятых сигналов для построения временных и частотных характеристик ионосферного канала.

В качестве примера на следующих рисунках показаны результаты обработки сигналов с шириной полосы 12 и 100кГц. На рис. 2 показаны сигналы на выходе согласованного фильтра, на рис. 3 – диаграммы задержка-доплер (функции рассеяния).

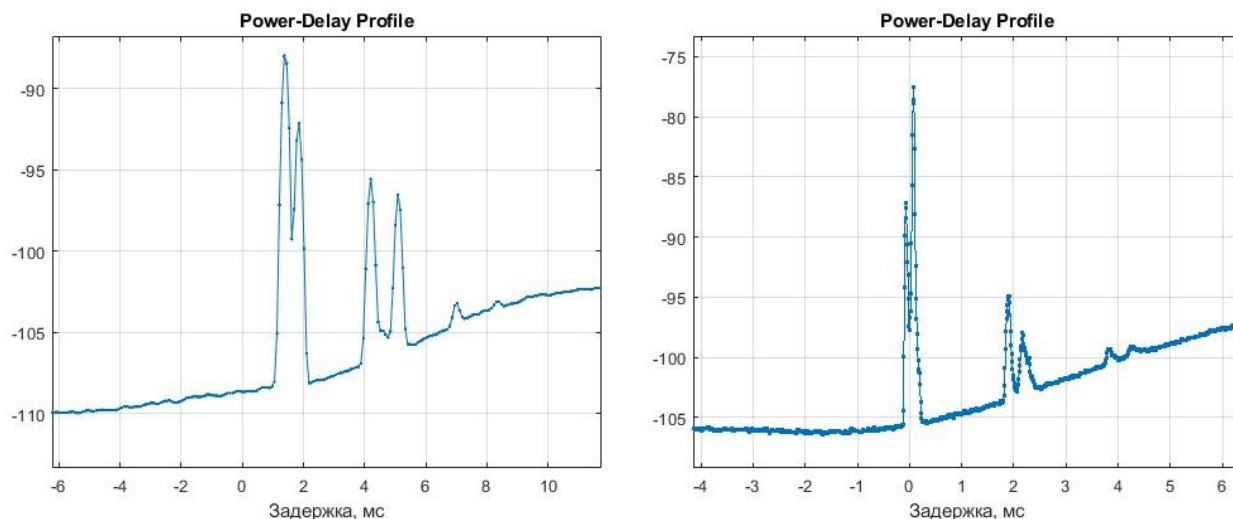


Рис. 2. Сигналы на выходе согласованного фильтра для ширины полосы 12кГц (слева) и 100кГц (справа)

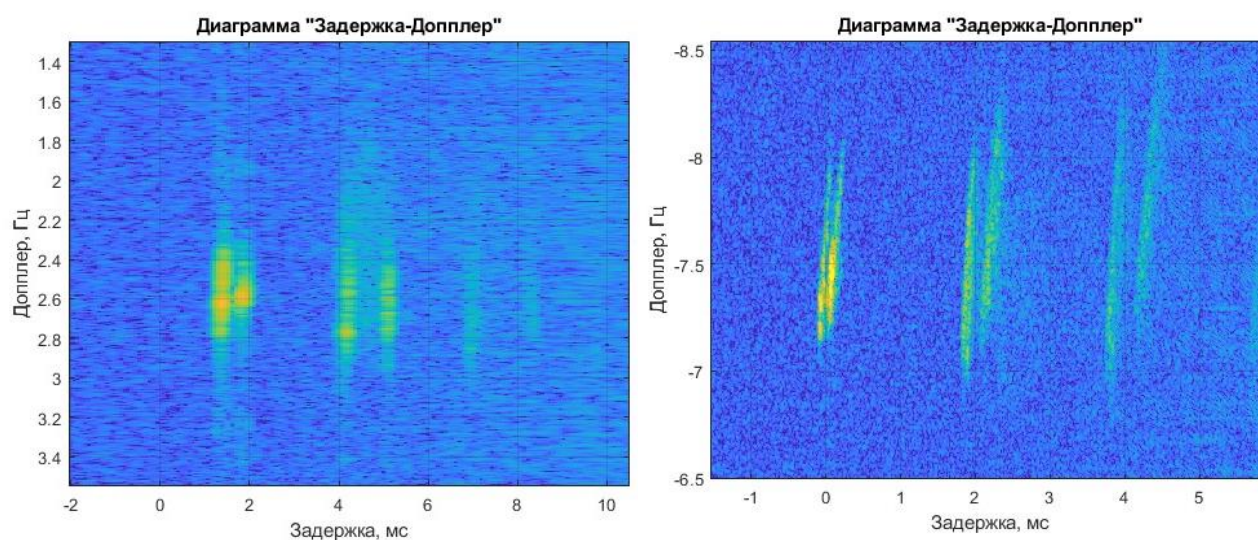


Рис. 3. Функции рассеяния для ширины полосы 12кГц (слева) и 100кГц (справа)

Как видно из рис. 2–3, наблюдаются 6 лучей. Максимальная задержка порядка 8 мс. Результаты рис. 2–3 позволяют рассчитать параметры модели ионосферного канала Воглера-Хофмайера.

На рис. 4 показана ионограмма, полученная ионозондом PARUS-A на момент проведения эксперимента. Как видно из рис. 4, выбранная в ходе эксперимента рабочая частота была близка к максимальной, наблюдались сигналы, отраженные от слоя F.

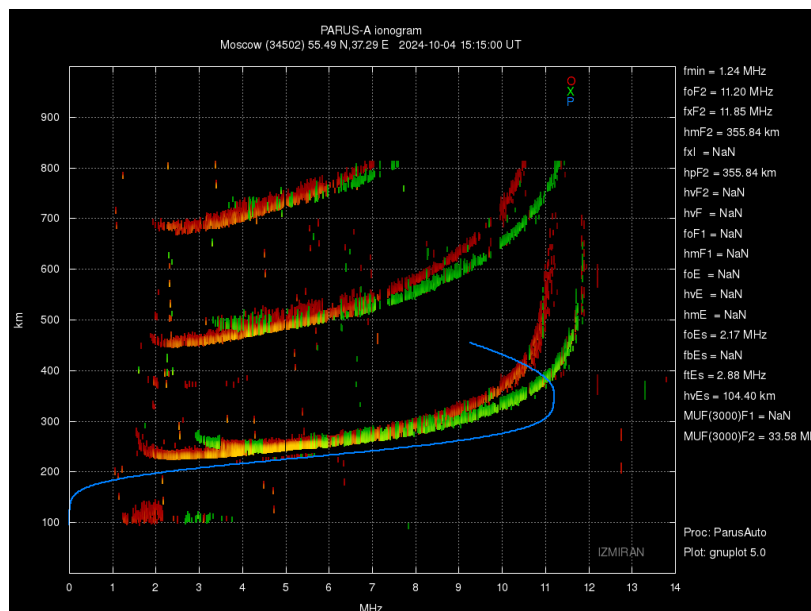


Рис. 4. Ионограмма, полученная ионозондом PARUS-A на момент проведения эксперимента

ВЫВОДЫ

Измерение импульсной характеристики и функции рассеяния в автоматическом режиме весьма затруднительно и требует применения алгоритмов режекции узкополосных помех особенно для ширины полосы канала 100кГц и более. На основе полученных результатов можно задать значения ключевых параметров для наиболее часто применяемых моделей ионосферных каналов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-19-00891, <https://rscf.ru/project/24-19-00891/>.

Список источников

1. Иванов Д. В. Развитие радиофизических методов и математических моделей исследования распространения в ионосфере сложных декаметровых сигналов и коррекции их дисперсионных искажений : дис. д-ра. физ.-мат. наук. Йошкар-Ола : МарГУ, 2007. 329 с.
2. Тихонов В. И. Оптимальный прием сигналов. Москва : Радио и связь, 1983. 320 с.
3. Фабрицио Дж. А. Высокочастотный загоризонтный радар: основополагающие принципы, обработка сигналов и практическое применение. Москва : Техносфера, 2018. 936 с. ISBN 978-5-94836-448-3.

**НЕЙРОСЕТЕВЫЕ АЛГОРИТМЫ ОБНАРУЖЕНИЯ
РАДИОСИГНАЛАС НЕИЗВЕСТНЫМИ ЧАСТОТОЙ,
АМПЛИТУДОЙ И НАЧАЛЬНОЙ ФАЗОЙ**

КОРЧАГИН Юрий Эдуардович, доктор физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой «Радиофизика»
Воронежский государственный университет
394018, Россия, Воронеж, korchagin@phys.vsu.ru

НГУЕН Ван Тхю, аспирант
Воронежский государственный университет
394018, Россия, Воронеж, thuynguyenvan59395@gmail.com

Аннотация. Построены два нейросетевых обнаружителя радиосигнала с неизвестными амплитудой, частотой и начальной фазой. Исходные данные для работы первого из них являются дискретные отсчеты наблюдаемой реализации, для второго – отсчеты спектрограммы. Выполнено статистическое моделирование и сравнение вероятностей ошибок со статистически оптимальными алгоритмами.

Ключевые слова: обнаружение, радиосигнал, неизвестные параметры, амплитуда, начальная фаза, частота, нейростеть, сверточный слой, полносвязный слой, вероятность ошибки.

**NEURAL NETWORK DETECTION ALGORITHMS
RADIO SIGNAL WITH UNKNOWN FREQUENCY,
AMPLITUDE AND INITIAL PHASE**

KORCHAGIN Yuriy Eduardovich, Doctor of Physico-Mathematical Sciences, Associate Professor, Head at the Department of «Radiophysics»
Voronezh State University
394018, Russia, Voronezh, korchagin@phys.vsu.ru

NGUYEN Van Thuy, PhD student
Voronezh State University
394018, Russia, Voronezh, thuynguyenvan59395@gmail.com

Abstract. Two neural network radio signal detectors with unknown amplitude, frequency, and initial phase have been built. The initial data for the operation

of the first of them are discrete samples of the observed realization, for the second – samples of the spectrogram. Statistical modeling and comparison of error probabilities with statistically optimal algorithms are performed.

Keywords: detection, radio signal, unknown parameters, amplitude, initial phase, frequency, neural network, convolutional layer, dense layer, error probability.

ВВЕДЕНИЕ

В практических приложениях теории связи, радио и гидролокации, радиоастрономии, сейсмологии, радиомониторинга довольно актуальной остается задача обнаружения радиосигнала с неизвестными частотно-временными параметрами. В работах [1, 2] исследованы алгоритмы обнаружения радиосигнала с неизвестными амплитудой и начальной фазой, поскольку они обычно неизвестны на приемной стороне в силу особенностей распространения сигнала. Оптимальные алгоритмы обработки сигналов, которые помимо амплитуды и начальной фазы обладают неизвестными частотой и длительностью, исследованы недостаточно. В данной работе предложены нейросетевые алгоритмы обработки таких радиосигналов.

Пусть подлежит обнаружению радиосигнал вида

$$s(t, a, \varphi, \omega, \tau) = \begin{cases} af(t) \cos(\omega t - \varphi), & 0 \leq t \leq \tau, \\ 0, & t < 0, \quad t > \tau, \end{cases} \quad (1)$$

где $f(t)$ – непрерывная функция, описывающая форму огибающей, a – амплитуда, ω – частота радиосигнала, $\varphi \in [0, 2\pi]$ – начальная фаза, τ – длительность, которая принимает значения из априорного интервала $\tau \in [T_1, T_2]$.

Задача обнаружения радиосигнала вида (1) была сформулирована в классическом виде. Предполагалось, что на интервале $[0, T]$ наблюдается реализация

$$\xi(t) = \gamma_0 s(t, a_0, \varphi_0, \omega_0, \tau_0) + n(t), \quad (2)$$

которая представляет собой аддитивную смесь полезного сигнала (1) и гауссовского белого шума $n(t)$ с односторонней спектральной плотностью N_0 , а $a_0, \varphi_0, \omega_0, \tau_0$ – истинные значения амплитуды, начальной фазы, частоты и длительности соответственно. Дискретный параметр γ принимает два значения

0 и 1 и характеризует отсутствие или наличие сигнала в принятой реализации. Располагая наблюдаемой реализацией $\xi(t)$ нужно принять решение о значении параметра γ . Наряду с общепринятыми статистически оптимальными алгоритмами обнаружения можно использовать нейросетевые обнаружители, что особенно актуально, когда часть априорных сведений о сигнале или шуме остается неизвестной. Были предложены два нейросетевых обнаружителя, входными данными которых являются дискретные отсчеты наблюдаемой реализации или дискретное представление ее спектрограммы.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Применение нейросети предполагает формирование радиосигнала с неизвестными амплитудой, частотой, начальной фазой и белого шума в виде дискретных отсчетов. На интервале наблюдения $[0, T]$ располагается $N = \text{int}(Tf_s)$ отсчетов, где f_s – частота дискретизации. В процессе формирования принятой реализации $\xi(t)$ с шагом $\Delta t = 1/f_s$ вычислялись отсчеты функций s_i и n_i . Таким образом, на вход нейросети поступают дискретные отсчеты ξ_i , $t_i = i\Delta t$, $i = \overline{1, N}$. Выходом нейросети должно являться решение о наличии или отсутствии сигнала. Был предложен нейросетевой алгоритм обнаружения, структурная схема которого показана на рис. 1.

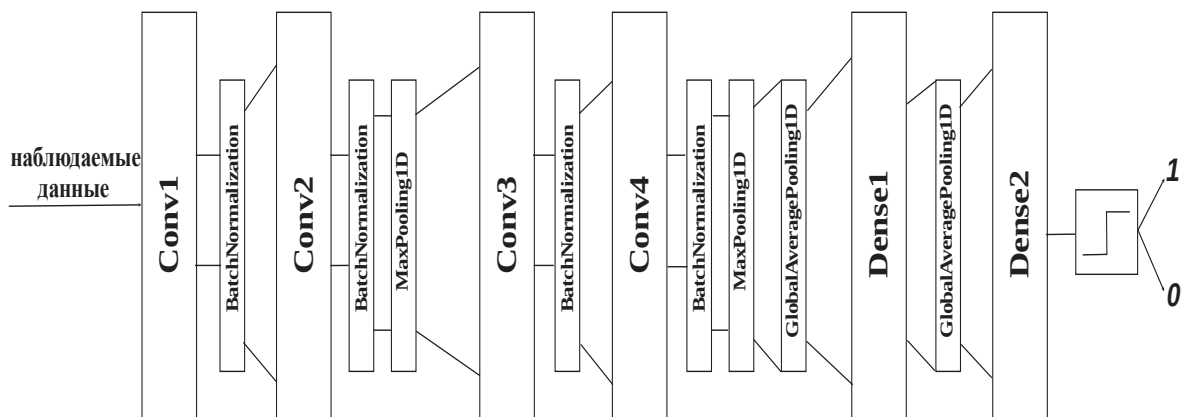


Рис. 1. Блок-схема нейросетевого обнаружителя

Модель включает два сверточных блока, каждый из которых состоит из двух сверточных слоев [3] с активацией ReLU и нормализацией

BatchNormalization [3], за которыми следует MaxPooling1D для уменьшения размерности признаков. Обучение модели осуществляется с оптимизатором Adam, функцией потерь categorical_crossentropy [3]. Здесь обозначено: Conv1, Conv2 – одномерные (conv1d) сверточные слои, которые содержат по 16 фильтров с длиной импульсной характеристики 7 отсчетов, Conv3, Conv4 – одномерные сверточные слои, которые содержат по 32 фильтра с длиной импульсной характеристики 7 отсчетов. Были выбраны функции активации сверточных слоев ReLu. MaxPooling – слои прореживания отсчетов сигнала в 3 раза. После сверточных блоков применяются GlobalAveragePooling1D, полносвязный слой Dense с 64 нейронами и ReLU, Dropout 0,5 и финальный Dense-слой с 2 нейронами и активацией softmax для бинарной классификации. В результате на выходе последнего слоя имеем два скалярных значения из отрезка $[0, 1]$. В результате их сравнения между собой выносится решение о наличии или отсутствии сигнала в принятой реализации.

Общий объем обучающей выборки составлял 40000 синтезированных реализаций, для каждой из которых отношение сигнал/шум выбиралось случайным. После обучения было выполнено статистическое моделирование нейросетевого обнаружителя, в ходе которого последовательно формировались входные реализации, присутствие сигнала в которых разыгрывалось с вероятностью 0,5 с помощью случайной величины. Вычислялся выход сети и фиксировался либо факт правильного или ошибочного решения. В качестве оценки вероятности ошибки использовалась относительная частота соответствующего ошибочного решения.

Вторая нейросетевая модель обнаружителя основана на анализе спектрограммы принятой реализации, пример которой изображен на рис. 2. При вычислении спектрограммы было использовано окно Хеннинга с наложением $1/2$. Структура нейросети была выбрана аналогично рис. 1, где в качестве наблюдаемых данных использовались дискретные отсчеты спектрограммы, а сверточные слои были двумерными (conv2d).

На рис. 3 представлены зависимости вероятности пропуска сигнала от ОСШ для МП алгоритмов обнаружения при всех известных параметрах сигнала (сплошная кривая), при неизвестных амплитуде и начальной фазе

(штриховая кривая), неизвестных амплитуде, начальной фазе и частоте (пунктирная кривая).

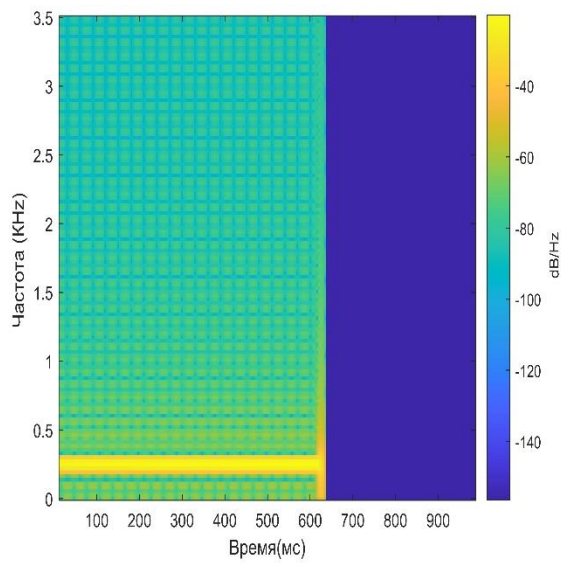


Рис. 2. Пример спектрограммы

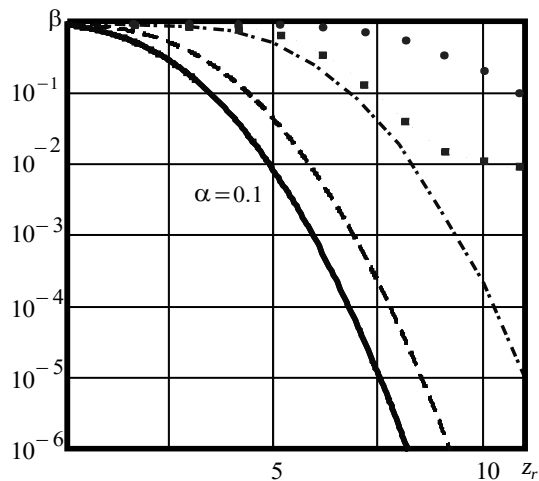


Рис. 3. Зависимость вероятности пропуска от ОСШ

Результаты статистического моделирования нейросетевых алгоритмов показаны кружками для исходных данных в виде отсчетов реализации и квадратиками для исходных данных в виде отсчетов спектрограммы.

ВЫВОДЫ

Нейросетевые алгоритмы обнаружения проигрывают по сравнению со статистически оптимальными. Их применение целесообразно при невозможности построения оптимальных обнаружителей ввиду недостатка априорных сведений.

При схожей структуре нейросетей лучшей эффективностью функционирования обладает сеть, основанная на анализе спектрограммы.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-19-00891, <https://rscf.ru/project/24-19-00891/>.

Список источников

1. Тихонов В. И. Оптимальный прием сигналов. Москва : Радио и связь, 1983. 320 с.
2. Теория обнаружения сигналов / П. С. Акимов [и др.] ; под общ. ред. П. А. Бакута. Москва : Радио и связь, 1984. 440 с.
3. Гудфеллоу Я., Бенджио И., Курвилль А. Глубокое обучение. Москва : ДМК Пресс, 2018. 652 с. ISBN: 978-5-97060-618-6.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕШАЮЩЕЙ СТАТИСТИКИ
АЛГОРИТМА ОЦЕНКИ НАКЛОНА ДИСПЕРСИОННОЙ
ХАРАКТЕРИСТИКИ ИОНОСФЕРНОГО КВ КАНАЛА**

КОРЧАГИН Юрий Эдуардович, доктор физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой «Радиофизика»
Воронежский государственный университет
394018, Россия, Воронеж, korchagin@phys.vsu.ru

ЦЫГАНКОВ Андрей Игоревич, аспирант
Воронежский государственный университет
394018, Россия, Воронеж, llongaa@mail.ru

Аннотация. Выполнено моделирование решающей статистики при оценке параметра наклона дисперсионной характеристики ионосферного КВ канала методом максимального правдоподобия при использовании пилотного радиоимпульса с прямоугольной огибающей. Показано, что расширение полосы частот зондирующего сигнала ведет к увеличению точности оценки.

Ключевые слова: ионосферный КВ канал, дисперсионная характеристика, параметр наклона, оценка максимального правдоподобия, решающая статистика, моделирование.

**MODELING LIKELIHOOD RATIO OF ALGORITHM
FOR ESTIMATING THE SLOPE OF THE VARIANCE
CHARACTERISTICS OF THE IONOSPHERIC HF CHANNEL**

Korchagin Yury Eduardovich, Doctor of Physico-Mathematical, Associate Professor, Head at the Department of Radiophysics
Voronezh State University
394018, Russia, Voronezh, korchagin@phys.vsu.ru

Tsygankov Andrey Igorevich, Postgraduate Student
Voronezh State University
394018, Russia, Voronezh, llongaa@mail.ru

Abstract. A simulation of the test statistics was performed for estimating the slope parameter of the dispersion characteristic of the ionospheric HF channel using the maximum likelihood method using a pilot radio pulse with a rectangular envelope.

It is shown that the expansion of the frequency band of the probing signal leads to an increase in the accuracy of the estimate.

Keywords: ionospheric HF channel, dispersion characteristic, slope parameter, maximum likelihood estimation, decisive statistics, modeling.

ВВЕДЕНИЕ.

В настоящее время широкое распространение получили средства связи, использующие КВ диапазон (3–30 МГц) в широкой полосе частот. Функционирование такой системы основано на принципе отражения электромагнитных волн от слоев ионосферы, что особенно важно для связи в труднодоступных местах. Однако условия распространения сигнала в ионосфере делают осуществление связи в широкой полосе частот достаточно трудно реализуемым ввиду влияния частотной дисперсии в ионосферном канале.

Актуальной задачей в таких условиях является разработка и верификация математических моделей ионосферного канала, адекватно описывающих его дисперсионные свойства, а также методов оценки параметров среды распространения. Одним из перспективных подходов является использование метода максимального правдоподобия (МП), позволяющего оценивать неизвестные параметры канала на основе анализа принятого зашумленного сигнала. В данной работе использована модель ионосферного КВ канала с дисперсией, описываемой параметром наклона дисперсионной характеристики S (время задержки на единицу полосы частот), и выполнено моделирование решающей статистики – логарифма функционала отношения правдоподобия (ЛФОП) – при оценивании наклона дисперсионной характеристики аналогично [1]. С помощью статистического моделирования получены статистические характеристики оценки – смещение и рассеяние. Дополнительно исследован вопрос соотношения ширины полосы частот канала с шириной полосы зондирующего сигнала.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Пусть имеется пилотный сигнал $s(t)$, который излучается на рабочей частоте f_p в течение времени длительности импульса τ . Пусть ионосферный канал

не меняется во времени и описывается импульсной характеристикой (ИХ), полученной сотрудниками Марийского государственного технического университета (МарГТУ) [2]

$$h(\tau) = \frac{e^{i\theta} H_0}{\sqrt{2S}} [\{C(z_2) - C(z_1)\} - i\{S(z_2) - S(z_1)\}], \quad (1)$$

где $\theta = -\varphi_0 + 2\pi f_p \tau + \frac{\pi}{S}(\tau - \tau(f_p))^2$, $C(z), S(z)$ – интегралы Френеля, $z_1 = (\tau - \tau(f_p))\sqrt{2/S} - \Delta f\sqrt{S/2}$, $z_2 = (\tau - \tau(f_p))\sqrt{2/S} + \Delta f\sqrt{S/2}$.

В ИХ (1) наклон дисперсионной характеристики входит как параметр $h(\tau, S)$. Сигнал на выходе ионосферного канала запишем через свертку входного сигнала с импульсной характеристикой $y(t, S) = s(t) * h(t, S)$.

Для оценки параметра S используем метод МП. Согласно этому методу на приемной стороне необходимо формировать логарифм функционала отношения правдоподобия (ЛФОП) и находить оценку $\hat{S} = \arg \max[L(S)]$.

$$L(S) = \frac{2}{N_0} \int_0^T \xi(t, S_0) s_{\text{оп}}(t, S) dt - \frac{1}{N_0} \int_0^T s_{\text{оп}}^2(t, S) dt.$$

Здесь $\xi(t, S) = y(t, S_0) + n(t)$ – наблюдаемая реализация смеси сигнала $y(t, S_0)$ и гауссовского белого шума $n(t)$ с односторонней спектральной плотностью N_0 , S_0 – истинное значение неизвестного параметра наклона дисперсной характеристики. Опорный сигнал $s_{\text{оп}}(t, S) = s(t) * h(t, S)$ был получен как результат преобразования пилотного сигнала ионосферным каналом для выбранных значений S из предполагаемого диапазона. Экспериментируя со значениями ширины полосы частот канала Δf и ширины полосы частот сигнала Δf_c , получили реализации ЛФОП, показанные на рис. 1–3.

При построении ширина полосы канала была выбрана раной 100 кГц, рабочая частота 1 МГц, отношение сигнал/шум по мощности $\frac{2E}{N_0} = 10$. На рис. 1 показана реализация ЛФОП, полученная для случая примерно равного ширине полосы частот канала и ширине полосы зондирующего сигнала. На рис. 2 изображена реализация ЛФОП для сигнала, ширина полосы которого примерно в 10 раз превышает полосу частот канала.

Как видно из рис. 2, решающая статистика имеет более узкий пик, что свидетельствует о более точной оценке параметра наклона дисперсионной

характеристики. На рис. 3 показана реализация ЛФОП при условии гораздо более узкополосного пилотного сигнала. Ширина его полосы примерно в 10 раз меньше предполагаемой ширины полосы частот ионосферного канала.

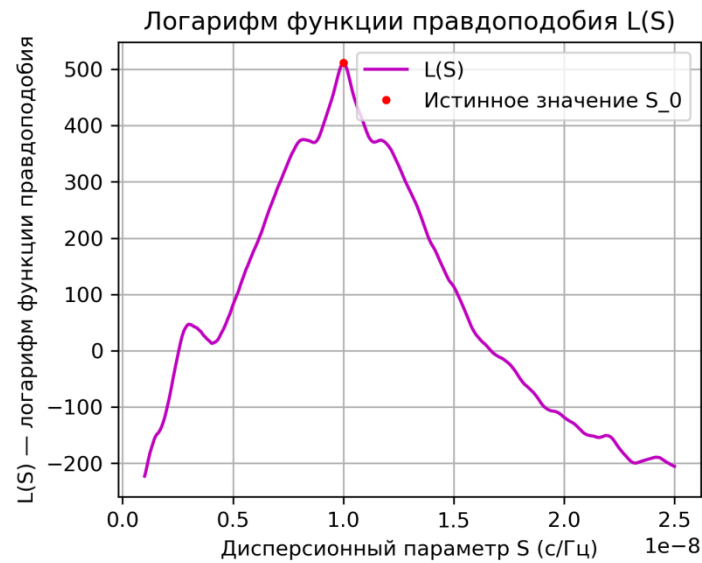


*Рис. 1. ЛФОП при совпадении ширины
полосы частот канала и сигнала*

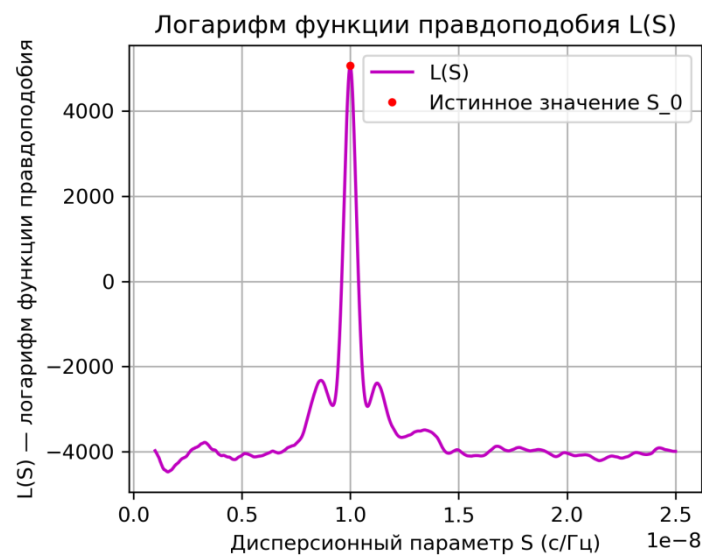


*Рис. 2. ЛФОП, характерный для широкополосного
пилотного сигнала*

Как видно из рис. 3, использование пилотного сигнала, ширина полосы которого гораздо меньше полосы частот канала приводит к меньшей точности оценки, а также вследствие наличия заметных боковых лепестков, может приводить к аномальным ошибкам при малых отношениях сигнал/шум.

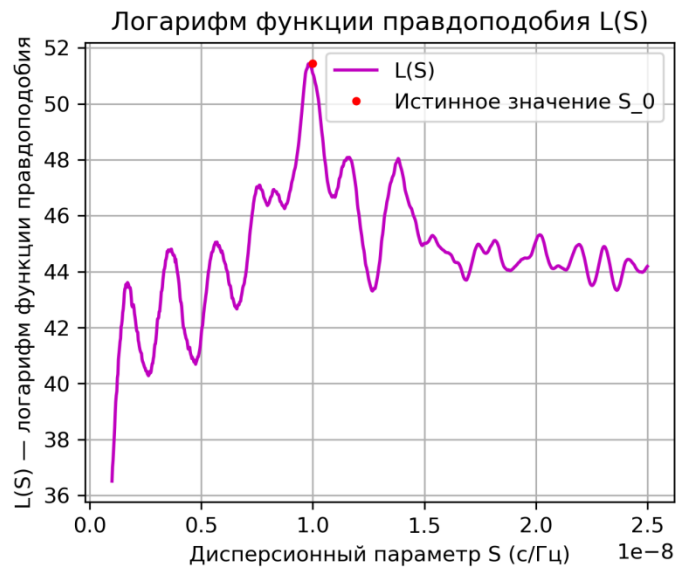


*Рис. 3. ЛФОП, характерный для узкополосного
пилотного сигнала*

ВЫВОДЫ

Моделирование решающей статистики максимально правдоподобного алгоритма оценки наклона дисперсионной характеристики при использовании в качестве пилотного сигнала прямоугольного импульса показывает целесообразность использования радиосигналов малой длительности, ширина спектра которых перекрывает ширину полосы частот канала. Вместе с тем следует заметить, что уменьшение длительности импульса требует увеличения его амплитуды для достижения приемлемого отношения сигнал/шум.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания вузам в сфере научной деятельности на 2023–2025 годы, проект N°FZGU-2023-0006.

Список источников

1. Cramer-Rao Bounds for Wideband Signal Parameters Joint Estimation in Ionospheric Frequency Dispersion Distortion Conditions / Lipatkin V. I., Lobov E. M., Lobova, E. O., Kandaurov N. A. DOI: 10.1109/IEEECONF51389.2021.9416074// Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, Conference Proceedings, Moscow, 2021. 7 p.

2. Иванов Д. В. Развитие радиофизических методов и математических моделей исследования распространения в ионосфере сложных декаметровых сигналов и коррекции их дисперсионных искажений : дис. д-ра. физ.-мат. наук. Йошкар-Ола : МарГУ, 2007. 329 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ УПРАВЛЯЕМОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ

КРЮКОВ Александр Николаевич, кандидат технических наук,
доцент, доцент кафедры радиотехнических устройств
Рязанский государственный радиотехнический университет
390005, Россия, Рязань, kryukov.a.n@rsreu.ru

Аннотация. Транзисторные выпрямители обладают большим током и меньшими искажениями за счет формирователя управляющих импульсов. Получены временные диаграммы для ТЗ отечественного.

Ключевые слова: преобразователь напряжения, управляемый выпрямитель, временные диаграммы.

CONTROLLED RECTIFIER RESEARCH

KRYUKOV Alexander Nikolaevich, Candidate of Engineering
Sciences, Associate Professor, Associate Professor
at the Department of radio engineering devices
Ryazan State Radio Engineering University
39005, Russia, Ryazan, kryukov.a.n@rsreu.ru

Abstract. Transistor rectifiers have a higher current and lower distortion due to the control pulse generator. Time diagrams for the Russian TK have been obtained.

Keywords: voltage converter, controlled rectifier, time diagrams

ВВЕДЕНИЕ

Применение для выпрямления преобразованного напряжения диодов ограничивает выходной ток и вносит в него искажения переходных процессов, частота которых определяется емкостью диода, индуктивностями рассеяния и соединительных проводников [1]. Транзисторные выпрямители освобождаются от этих недостатков добавлением формирователя управляющих импульсов.

Исследование характеристик управляемого выпрямителя производилось в программе Micro-CAP v.8 [2]. В модель S_BUCK_SIN.cir [3] с идеальными

ШИМ-контроллером (X3) и формирователем управляющих импульсов (Dead Time For Synchro Rectification) для упрощения получения временных диаграмм были добавлены резисторы R5 - R7 0,01 Ом и конденсатор C3=1500 мкФ, изменена величина резистора обратной связи $R_{upper} = 2$ кОм. В качестве ключа X4 использован MTD1306, номиналы остальных элементов подписаны на рис. 1.

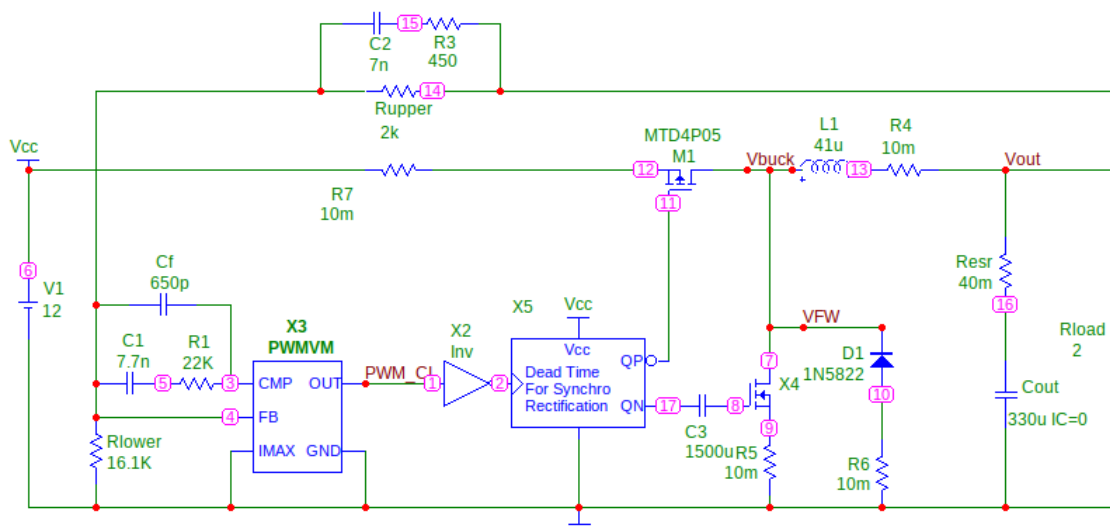


Рис. 1. Схема модели понижающего преобразователя напряжения с управляемым выпрямителем

РЕЗУЛЬТАТЫ

Формирователь (Dead Time For Synchro Rectification), получив сигнал от ШИМ-контроллера (рис. 2), сразу вырабатывает сигнал на закрытие ключа X4 выпрямителя, после чего с задержкой, чтобы выпрямитель успел закрыться, инвертированный сигнал на открытие ключа M1. Протекает ток от источника V1 через дроссель L1 и нагрузку Rload, дроссель L1 запасает энергию в форме магнитного поля. Импульс ШИМ-контроллера заканчивается, с задержкой от формирователя закрывается ключ M1 и с задержкой от формирователя на время закрытия ключа M1 открывается ключ X4 выпрямителя. Через резистор R5 начинает протекать ток синхронного выпрямителя, источником которого служит энергия, запасенная дросселем L1 в форме магнитного поля.

По мере заряда конденсатора Cout уменьшается ширина импульсов ШИМ-контроллера и ток, протекающий через выпрямитель X4 $I(R5)$. Также уменьшается и ток, потребляемый от источника питания $I(R7)$.

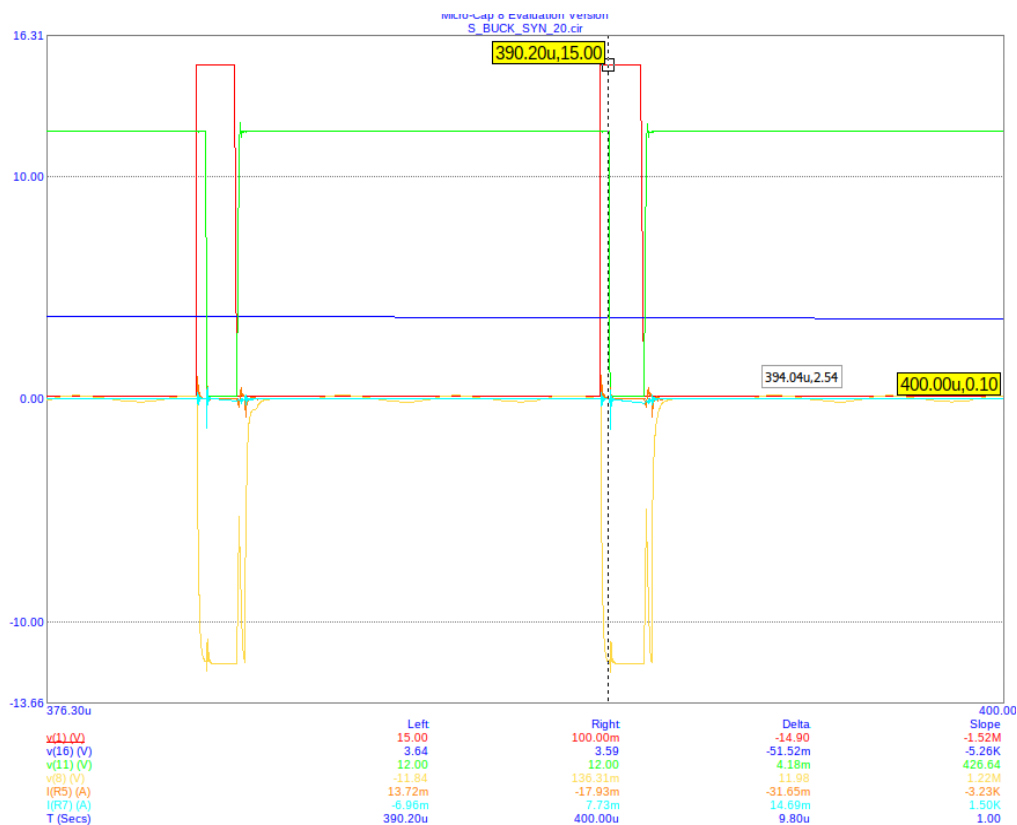


Рис. 2. Временные диаграммы работы понижающего преобразователя напряжения с управляемым выпрямителем

Здесь:

v(1), В – импульсы ШИМ-контроллера (красный график);

v(16), В – выходное напряжение (синий график);

v(11), В – инверсное напряжение открытия ключа M1 (зелёный график);

v(8), В – напряжение открытия выпрямителя X4 (жёлтый график);

I(R5), А – ток синхронного выпрямителя (коричневый график);

I(R7), А – потребляемый ток (голубой график).

ВЫВОДЫ

Подборкой задержек включения и выключения ключа синхронного выпрямителя можно ограничить величину напряжения, генерируемого индуктивностями рассеяния, минимизировать время проводимости внутреннего диода MOSFET выпрямителя и обеспечить оптимальный КПД преобразователя напряжения.

Корректно выбранная величина задержки позволяет избежать одновременного включения транзисторов M1 и X4 [4].

Увеличение сопротивления обратной связи R_{upper}, сопротивления нагрузки R_{load} ускоряет процесс заряда конденсатора C_{out} и достижение равновесного состояния схемой модели понижающего преобразователя напряжения и не оказывает влияния на временные соотношения сигналов.

Список источников

1. Сажнев А. М., Рогулина Л. Г. Электропреобразовательные устройства радиоэлектронных средств : учебник для вузов. 2-е изд., испр. и доп. Москва : Юрайт, 2025. 204 с. URL: <https://urait.ru/bcode/562948> (дата обращения: 06.08.2025). Режим доступа: для зарегистрир. пользователей. ISBN 978-5-534-11859-9.

2. Амелина М. А., Амелин С. А. Программа схемотехнического моделирования Micro-Cap. Версии 9, 10. Смоленск : Смоленский филиал НИУ МЭИ, 2013. 617 с., ил.

3. Basso C. P. Switch-Mode Power Supply Spice Cookbook. McGraw-Hill, 2001. 320 p. ISBN 0-07-137509-0.

4. Любимов В. Синхронные выпрямители // Электронные компоненты. 2018. № 9. С. 37-41.

ОЦЕНКА ТЕХНОЛОГИЙ ПЕРЕДАЧИ СВЯЗИ 5G С ПОМОЩЬЮ СИСТЕМ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ

КУЗНЕЦОВ Никита Максимович, студент
Омский государственный технический университет
644050, Россия, Омск, nik.kuzneczov.06@inbox.ru

НАЗАРУК Елена Маратовна, доцент
Омский государственный технический университет
644050, Россия, Омск, elmarnaz@mail.ru

ВОРОНЦОВ Андрей Михайлович, студент
Омский государственный технический университет
644050, Россия, Омск, amvorontsov@st.omgtu.ru

Аннотация. В данной статье проводится оценка возможностей и ограничений интеграции технологий 5G с системами спутниковой связи в рамках технологии Non-Terrestrial Networks. Анализируются ключевые показатели производительности (задержка, пропускная способность, покрытие, энергопотребление терминала).

Ключевые слова: 5G, спутниковая связь, покрытие, NTN, LEO.

EVALUATION OF 5G DATA TRANSMISSION TECHNOLOGIES USING SATELLITE COMMUNICATION SYSTEMS

KUZNETSOV Nikita Maksimovich, student
Omsk State Technical University
644050, Russia, Omsk, nik.kuzneczov.06@inbox.ru

NAZARUK Elena Maratovna, Associate Professor
Omsk State Technical University
644050, Omsk, Russia, elmarnaz@mail.ru

VORONTSOV Andrey Mikhailovich, student
Omsk State Technical University
644050, Omsk, Russia, amvorontsov@st.omgtu.ru

Abstract. This article assesses the potential and limitations of integrating 5G technologies with satellite communication systems within the framework

of non-terrestrial networks. Key performance indicators (latency, throughput, coverage, and terminal power consumption) are analyzed.

Keywords: 5G, satellite communications, coverage, NTN, LEO.

ВВЕДЕНИЕ

Технологии пятого поколения мобильной связи изначально разрабатывались для наземных сетей, преимуществами которых являются сверхвысокие скорости передачи данных и низкая задержка, а также более высокое количество подключенных устройств на 1 км² по сравнению с прошлыми поколениями мобильной связи. Но у нее есть существенный минус – покрытие наземных базовых станций не способно покрыть большую часть территорий земли, так как установка вышек сотовой связи или прокладка оптоволокна на многих участках трудозатратна или экономически не выгодна. [1] Для решения данной проблемы активно развивается внедрение технологий 5G в спутниковые системы связи. Данная концепция получила название Non-Terrestrial Networks (NTN) [2].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для оценки возможности установления сигнала между пользовательским устройством и спутником необходимо рассчитать энергетический бюджет канала. Основным фактором потерь при передаче сигнала является снижение силы сигнала при его распространении через свободное пространство (обычно воздух) между передатчиком и приемником (FSPL).[3] При использовании технологии Direct to Cell и LEO-спутника потери достигают значения до 159–165 дБ, что в сравнении с наземными потерями в сетях равными 100–130 дБ больше. А при мощности стандартного смартфона приблизительно равной 23 дБм и при коэффициенте усиления антенны приблизительно равной 0 дБи, мы получаем, что принятая мощность спутниковым приемником будет значительно малой и равной -142 дБм. При использовании же других типов спутников задержка будет равна 175–180 дБ для среднеорбитальных и 190 дБ –для геостационарных (GEO). На основе данного расчета можно сделать вывод, что для обеспечения

отношения сигнал-шум, достаточного хотя бы для модуляции, спутник должен быть оснащен антенной решеткой с коэффициентом усиления сигнала не менее 30–35 дБи. Данный вывод так же подтверждает необходимость использования технологии передачи беспроводного сигнала Beamforming, который формирует направленный луч в сторону принимающего устройства [3].

Технология мобильной связи 5G использует OFDM модуляцию, которая в свою очередь критически чувствительна к частотным сдвигам. При использовании для передачи сигнала низкоорбитального LEO-спутника, находящегося на высоте 600 км и движущегося со скоростью приблизительно равной 7,56 км/с, можно рассчитать доплеровский сдвиг, который будет равняться 50,4 кГц. В технологии 5G NR стандартный частотный разнос поднесущих (SCS) составляет 15 кГц, 30 кГц, 60 кГц или 120 кГц. Анализируя полученный сдвиг с LEO-спутника равный 50,4 кГц, можно сделать вывод, что он превышает базовый SCS равный 15 кГц более чем в 3 раза и что без компенсации данного сдвига можно полностью потерять связь [4].

Так же для оценки данной технологии передачи связи важным фактором является задержка передачи сигнала. Так, при использовании LEO-спутника задержка без обработки составляет 10 мс, а с учетом обработки она увеличивается до 20–30 мс, что в сравнении с передачей связи через наземные передатчики, у которых задержка составляет 5–20 мс, больше, но в то же время меньше, чем задержка спутников, расположенных на других орбитах, у которых задержка составляет 100–150 мс для среднеорбитальных (MEO) и 540 мс геостационарных (GEO) [5, 6].

ВЫВОДЫ

Оценка технологий передачи связи 5G с помощью систем спутниковой связи показывает, что физическая реализация возможна и имеет много преимуществ, но требует существенной адаптации. Исходя из данных расчетов можно сделать вывод, что одним из ключевых ограничивающих факторов является энергетический бюджет канала связи. Так, для технологии Direct to Cell требуется использование спутниковых антенн с высоким коэффициентом усиления

(не менее 30–35 дБи) [7]. Также ограничивающим фактором является доплеровский сдвиг, который может привести к полной потере сигнала [8].

Наиболее эффективным для данной технологии передачи связи будет использование спутниковых LEO-систем, они способны обеспечить покрытие 5G там, где наземная инфраструктура экономически невыгодна или трудозатратна [9]. Обеспечивая минимальную задержку и достаточную скорость передачи данных, они удовлетворяют требованиям технологии eMBB и частично технологии mMTC. Для технологии URLLC данный тип передачи мобильной связи остается не удовлетворительным, так как не способен достичь настолько низкой задержки передачи сигнала равной 1 мс [10].

Список источников

1. Чернецова Е. А. Системы и сети передачи данных: мобильная связь поколения 5G. Санкт-Петербург : Лань, 2023. 152 с. ISBN 978-5-507-47800-2.
2. Радиопередающие устройства в системах радиосвязи / Ю. Т. Зырянов и др. 6-е изд., стер. Санкт-Петербург : Лань, 2023. 176 с. ISBN 978-5-507-46244-5.
3. Мачихин В. А. Системы и сети связи с подвижными объектами : учебно-методическое пособие. Самара : ПГУТИ, 2021. 68 с.
4. Касьянов А. О. Реконфигурируемые антенные решетки и интеллектуальные радиоэлектронные покрытия. Методы проектирования и области применения : монография. Ростов-на-Дону : ЮФУ, 2024. 263 с. ISBN: 978-5-9275-4859-0.
5. Проблемы техники и технологий телекоммуникаций ПТиТТ-2020 : материалы XXII Международной научно-технической конференции, г. Самара, 17–20 ноября 2020 г. Самара : ПГУТИ, 2020. 393 с.
6. Бабин Н. Н., Воробьев О. В., Павлова Г. Г. Системы подвижной спутниковой связи : учебное пособие. Санкт-Петербург : СПбГУТ им. М.А. Бонч-Бруевича, 2021. 99 с.
7. Журавлев А. Е., Макшанов А. В., Иванищев А. В. Инфокоммуникационные системы. Аппаратное обеспечение : учебник для СПО. 4-е изд., стер. Санкт-Петербург : Лань, 2026. 396 с. ISBN 978-5-507-54552-0.

8. Бычков Е. Д., Коваленко О. Н. Искусственный интеллект в системах связи : учебное пособие. Омск : ОмГУПС, 2024. 87 с.

9. Чечин Г. В. Спутниковые системы связи на базе негеостационарных ретрансляторов : учебное пособие. Москва : Горячая линия-Телеком, 2022. 102 с. ISBN 978-5-9912-0862-8.

10. Развитие сетей мобильной связи от 5G Advanced к 6G: проекты, технологии, архитектура : учебное пособие / В. О. Тихвинский, С. В. Терентьев, В. А. Коваль, Е. Е. Девяткин. 2-е изд., доп. Москва : Техносфера, 2024. 532 с. ISBN 978-5- 94836-690-6.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО
АЛГОРИТМА МАРШРУТИЗАЦИИ
ДЛЯ БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЕЙ**

ЛАВРЕНТЬЕВ Максим Максимович, студент
Омский государственный технический университет
644050, Россия, Омск, M281106S@yandex.ru

НАЗАРУК Елена Маратовна, доцент
Омский государственный технический университет
644050, Россия, Омск, elmarnaz@mail.ru

ВОРОНЦОВ Андрей Михайлович, студент
Омский государственный технический университет
644050, Россия, Омск, amvorontsov@st.omgtu.ru

Аннотация. Суть работы заключается в повышении энергоэффективности беспроводных сенсорных сетей за счет разработки модифицированного алгоритма маршрутизации на основе протокола LEACH (Low-energy adaptive clustering hierarchy – протокол адаптивного кластеринга с низким потреблением энергии).

Ключевые слова: беспроводные сенсорные сети, энергоэффективность, алгоритмы маршрутизации, время жизни сети, кластеризация, протокол LEACH, моделирование OMNeT++.

**MODELING AN ENERGY-EFFICIENT ROUTING
ALGORITHM FOR WIRELESS SENSOR NETWORKS**

LAVRENTIEV Maxim Maximovich, student
Omsk State Technical University
644050, Russia, Omsk, M281106S@yandex.ru

NAZARUK Elena Maratovna, Associate Professor
Omsk State Technical University
644050, Russia, Omsk, elmarnaz@mail.ru

VORONOV Andrey Mikhailovich, student
Omsk State Technical University
644050, Russia, Omsk, amvorontsov@st.omgtu.ru

Abstract. The goal of this work is to improve the energy efficiency of wireless sensor networks by developing a modified routing algorithm based on the LEACH (Low-energy adaptive clustering hierarchy) protocol.

Keywords: wireless sensor networks, energy efficiency, routing algorithms, network lifetime, clustering, LEACH protocol, OMNeT++ modeling.

ВВЕДЕНИЕ

В рамках данной статьи предлагается модификация протокола LEACH, учитывающая остаточную энергию узлов и расстояние до базовой станции при выборе кластерных голов. Для проверки эффективности разработанного алгоритма проведено имитационное моделирование в среде OMNeT++ (Objective Modular Network Testbed in C++) с использованием фреймворка INET.

РЕЗУЛЬТАТЫ

LEACH-EE имеет значительное превосходство перед базовыми протоколами маршрутизации. Количественная оценка показывает значительное увеличение времени жизни сети по всем критически важным функциям. В частности, модифицированный алгоритм позволил отсрочить гибель первого узла до 210 раундов работы, что на 68 % превышает показатель классического LEACH и на 27 % лучше результата LEACH-C [1]. Анализ продолжительности функционирования сетевой инфраструктуры в целом выявил увеличение времени до гибели половины узлов на 33 % относительно базового протокола и на 17 % относительно централизованной версии, а полное время жизни сети возросло на 25 % и 15 % соответственно.

Динамика энергопотребления в сети при использовании предложенного решения приобрела более стабильный и предсказуемый характер в сравнении с контрольными алгоритмами. Визуализация процессов потребления энергии демонстрирует, что LEACH характеризуется выраженной неравномерностью с резкими скачками энергозатрат, что напрямую связано со стохастической природой выбора кластерных голов [2]. Протокол LEACH-C показывает более сглаженную

динамику, однако сохраняет периодические всплески потребления, тогда как LEACH-EE обеспечивает наиболее плавный и оптимизированный график энергопотребления throughout всей продолжительности эксперимента.

Важнейшим достижением предложенной модификации стало обеспечение равномерного распределения энергетической нагрузки across всей сетевой инфраструктуры. Статистический анализ остаточной энергии узлов после 200 раундов работы выявил качественные различия в распределении ресурсов. При использовании базового протокола LEACH наблюдался значительный разброс показателей остаточной энергии – от 0,1 до 1,2 Дж, что свидетельствует о крайне неравномерном расходе батарей разных узлов. Алгоритм LEACH-C продемонстрировал улучшение данного параметра с диапазоном от 0,3 до 1,0 Дж, однако предлагаемое решение LEACH-EE обеспечило наилучший результат с показателями от 0,6 до 0,9 Дж, что подтверждает эффективность механизма балансировки нагрузки [1–5].

Статистическая обработка полученных данных методами дисперсионного анализа при уровне значимости $p < 0,05$ подтвердила достоверность преимуществ разработанного алгоритма. Выявлены статистически значимые различия между всеми тремя протоколами с значением $F = 45,32$ при $p = 0,0001$. Важно отметить, что алгоритм LEACH-EE продемонстрировал наименьший разброс показателей с коэффициентом вариации всего 12,3 % против 28,7 % у LEACH и 19,4 % у LEACH-C, что дополнительно подтверждает его стабильность и предсказуемость работы. Объяснение столь значительного улучшения характеристик сети кроется в комплексном подходе к выбору кластерных голов, при котором одновременно учитывается как остаточная энергия узлов, предотвращающая выбор в качестве маршрутизаторов устройств с истощенными батареями, так и оптимизация расстояния до базовой станции, снижающая энергозатраты на передачу данных. Адаптивный весовой коэффициент k обеспечивает оптимальный баланс между этими двумя факторами, позволяя эффективно распределять нагрузку между узлами с различными характеристиками [4]. Наибольшая эффективность предложенного алгоритма проявляется в сценариях развертывания сети с большим количеством узлов, их неравномерным spatial

распределением и требованиями к длительной автономной работе, при этом дополнительные затраты на передачу служебной информации полностью компенсируются значительным увеличением времени жизни всей сетевой инфраструктуры.

ВЫВОДЫ

В рамках проделанной работы был рассмотрен алгоритм, который демонстрирует повышенную энергоэффективность и может быть рекомендован для применения в реальных развертываниях беспроводных сенсорных сетей с длительным временем автономной работы.

Список источников

1. Wireless sensor networks: a survey / I. F. Akyildiz et al. DOI:10.1016/S1389-1286(01)00302-4 // Computer Networks. 2002. Vol. 38, No. 4. P. 393–422.
2. Heinzelman, W. R., Chandrakasan, A., Balakrishnan, H. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks. DOI: 10.1109/HICSS.2000.926982 // Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences. 2000. P. 10–20.
3. ГОСТ Р ИСО 5725-1-2002. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 1. Основные положения и определения : введ. 2002-11-01. Москва : ИПК Издательство стандартов, 2002. 25 с.
4. Varga A., Hornig R. An overview of the OMNeT++ simulation environment. DOI:10.1145/1416222.1416290 // Proceedings of the 1st International Conference on Simulation Tools and Techniques for Communications, Networks and Systems. 2008. 10 p.

АЛГОРИТМИЧЕСКАЯ И ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ОЦИФРОВКИ КАЧЕСТВЕННЫХ ШКАЛ НА ОСНОВЕ МЕТОДА УВЕРЕННЫХ СУЖДЕНИЙ

ЛАЗАРЕНКО Валерий Андреевич, магистрант
*Поволжский государственный университет
телекоммуникаций и информатики
443031, Россия, Самара, Lva280102@gmail.com*

СМИРНОВ Сергей Викторович,
доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры информатики и робототехнических систем
*Поволжский государственный университет
телекоммуникаций и информатики
443090, Россия, Самара, sergvic@list.ru*

Аннотация. Разработана программная реализация метода уверенных суждений С. А. Пиявского в виде библиотеки на Python для цифровизации качественных оценок. Решение расширяет инструментарий доступных методов преобразования вербальных формулировок экспертов в количественные шкалы. Библиотека предоставляет функционал для работы с различными типами качественных признаков и может интегрироваться в системы поддержки принятия решений. Реализация метода Пиявского создает дополнительную возможность для решения задач многокритериального выбора в условиях цифровой трансформации.

Ключевые слова: алгоритм, программная реализация, шкалирование, многокритериальный анализ, система поддержки принятия решений, Python.

ALGORITHMIC AND SOFTWARE IMPLEMENTATION FOR DIGITALIZATION OF QUALITATIVE SCALES BASED ON THE METHOD OF CONFIDENT JUDGMENTS

LAZARENKO Valeriy Andreevich, Master's student
*Povolzhsky State University of Telecommunications and Informatics
443031, Russia, Samara, Lva280102@gmail.com*

SMIRNOV Sergey Viktorovich,
Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Professor
at the Department of computer science and robotic systems

Abstract. A software implementation of S.A. Piyavsky's method of confident judgments has been developed as a Python library for digitalization of qualitative assessments. The solution expands the toolkit of available methods for converting expert verbal formulations into quantitative scales. The library provides functionality for working with various types of qualitative features and can be integrated into decision support systems. The implementation of Piyavsky's method creates an additional opportunity for solving multicriteria choice problems in the context of digital transformation.

Keywords: algorithm, software implementation, scaling, multicriteria analysis, decision support system, Python.

ВВЕДЕНИЕ

Процесс цифровизации, рассматриваемый здесь как перевод качественных оценок свойств объекта в порядковую шкалу – например, «удовлетворительно», «хорошо», «отлично» – в количественные значения, сталкивается с существенными смысловыми трудностями. Метод уверенных суждений, предложенный С. А. Пиявским для решения многокритериальных задач [1, 2], обозначил эффективный подход к этой проблеме. Особую значимость представляет разработка программных решений, позволяющих решать задачи многокритериального выбора. Распространение предложенного подхода, который вполне теоретически обоснован, сдерживается отсутствием для него готовых программных решений. Задача оцифровки порядковых шкал обусловлена растущей потребностью в инструментах формализации экспертных знаний для систем поддержки принятия решений в условиях цифровой трансформации управления. Необходим программный модуль, который позволил бы преодолеть разрыв между теоретическими разработками в области многокритериального анализа и их практическим применением в реальных системах. Существующие программные пакеты либо не реализуют метод уверенных суждений в полной мере, либо требуют сложной адаптации для решения прикладных задач.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Цель исследования и разработки – создать программную библиотеку, реализующую функционал для цифровизации качественных шкал на основе метода уверенных суждений С. А. Пиявского с намерением их использования в задачах многокритериального выбора. Решение будет предоставлено на языке программирования Python [3 В ходе работы разработана архитектура библиотеки, включающая модуль ввода и валидации экспертных сравнений, блок построения «политики выбора» [1, 2], алгоритм вычисления согласованных весов критериев и модуль визуализации результатов. Библиотека поддерживает работу с качественными порядковыми шкалами, включающими до 10 различных значений. Особенностью разработки является возможность интеграции с популярными Python-библиотеками для анализа данных (pandas, numpy) и машинного обучения (scikit-learn). Проведенный анализ и разработка демонстрируют работоспособность подхода на практике. Созданный программный модуль позволяет автоматизировать процесс формализации экспертных мнений, позволяя использовать после их цифровизации богатую палитру численных методов поддержки принятия решений. Апробация программного комплекса проведена на примере решения практической задачи кадрового отбора с использованием взаимосвязанных критериев оценки, охватывающих профессиональные компетенции, личностные характеристики и перспективы долгосрочного взаимодействия. Тестирование системы подтвердило ее эффективность для многокритериального анализа качественных данных в условиях реальной бизнес-задачи, требующей комплексного учета различных факторов при принятии кадровых решений. Полученные результаты демонстрируют повышение согласованности групповых экспертных оценок относительно традиционных методов ранжирования при сокращении времени обработки данных. Установлено, что предложенная реализация обеспечивает более устойчивые решения к изменению состава экспертной группы и вариациям исходных данных, а также способствует снижению субъективности при формировании итоговых рекомендаций.

ВЫВОДЫ

Работа имеет практическое значение для создания более обоснованных и прозрачных систем поддержки принятия решений в управлении и проектировании. Разработанная библиотека представляет собой готовое программное решение для исследователей и практиков, работающих в области многокритериального анализа. Основные преимущества реализации включают открытый исходный код, простоту интеграции в существующие аналитические системы и поддержку современных стандартов разработки на Python. Доказана эффективность применения метода уверенных суждений Пиявского в сочетании с алгоритмической реализацией для задач стратегического планирования и проектного управления. Перспективы дальнейшего развития включают расширение функциональности библиотеки за счет реализации методов группового экспертного оценивания, разработки веб-интерфейса для удаленной работы и интеграции с облачными аналитическими платформами. Внедрение предложенного решения позволит существенно повысить качество процессов принятия решений в корпоративных системах управления за счет использования математически обоснованных методов обработки качественных экспертных оценок.

Список источников

1. Пиявский С. А., Малышев В. В. Новые методы принятия многокритериальных решений в цифровой среде. Москва : Наука, 2022. 370 с. ISBN 978-5-02-040885-2.
2. Пиявский С. А. Как «нумеризовать» понятие «важнее». DOI: 10.18287/2223-9537-2016-6-4-414-435 // Онтология проектирования. 2016. Т. 6, № 4. С. 414–435.
3. Васильев А. Н. Программирование на Python в примерах и задачах. Москва : Эксмо, 2024. 616 с. ISBN 978-5-04-103199-2
4. Бхаргава А. Грокаем алгоритмы. Иллюстрированное пособие для программистов и любопытствующих / пер. с англ. А. А. Слинкина. Санкт-Петербург : Питер, 2022. 366 с. ISBN 978-5-4461-2924-9.
5. Грас Дж. Data Science. Наука о данных с нуля. 2-е изд. Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2023. 416 с. ISBN 978-5-9775-6731-2.

**ФОРМАЛИЗАЦИЯ КАЧЕСТВЕННЫХ СУЖДЕНИЙ
КАК СРЕДСТВО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ
МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫХ РЕШЕНИЙ**

ЛАЗАРЕНКО Валерий Андреевич, магистрант
*Поволжский государственный университет
телекоммуникаций и информатики
443031, Россия, Самара, Lva280102@gmail.com*

СМИРНОВ Сергей Викторович, доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры информатики и робототехнических систем
*Поволжский государственный университет
телекоммуникаций и информатики
443090, Россия, Самара, sergvic@list.ru*

Аннотация. Исследуется метод С. А. Пиявского как альтернатива традиционным подходам многокритериального принятия решений. Анализируются ограничения существующих методов и предлагается теоретическая база на основе систем сравнительных оценок. Доказано, что подход обеспечивает математическую строгость измерений и исключает методологические ошибки традиционных методов. Результаты создают основу для разработки надежных систем поддержки принятия решений.

Ключевые слова: теория принятия решений, многокритериальность, формализация, бинарные отношения, шкалирование, нечисловая математика, системный анализ.

**FORMALIZATION OF QUALITATIVE JUDGMENTS
AS A MEANS OF IMPROVING MULTICRITERIA DECISIONS**

LAZARENKO Valeriy Andreevich, Master's student
*Povolzhsky State University of Telecommunications and Informatics
443031, Russia, Samara, Lva280102@gmail.com*

SMIRNOV Sergey Viktorovich,
Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor,
Professor at the Department of computer science and robotic systems
*Povolzhsky State University of Telecommunications and Informatics
443090, Russia, Samara, sergvic@list.ru*

Abstract. The study examines S.A. Piyavsky's method as an alternative to traditional approaches in multicriteria decision-making. The limitations of existing methods are analyzed, and a theoretical foundation based on systems of comparative evaluations is proposed. It is proven that this approach ensures mathematical rigor in measurements and eliminates methodological errors inherent in traditional methods. The results establish a foundation for developing reliable decision support systems.

Keywords: decision theory, multicriteria analysis, formalization, binary relations, scaling, non-numerical mathematics, systems analysis.

ВВЕДЕНИЕ

Современная теория принятия решений сталкивается с фундаментальной проблемой методологической обоснованности цифровизации качественных экспертных оценок в количественные показатели. Широко распространенный в прикладных исследованиях метод анализа иерархий, разработанный Т. Саати, демонстрирует определенные ограничения в контексте обоснованности получаемых результатов. Получаемые числовые значения характеризуются недостаточным уровнем методологической валидности, поскольку процедура их получения не учитывает природу измеряемых качественных конструктов.

Альтернативный методологический подход, предложенный С. А. Пиявским, базируется на принципах системного сравнительного анализа и современной теории измерений [1, 2]. Качественные суждения Пиявского представляют собой методологический аппарат, позволяющий осуществлять цифровизацию экспертных оценок с сохранением их семантической целостности. В отличие от метода анализа иерархий, где осуществляется непосредственная квантификация экспертных предпочтений, подход Пиявского сохраняет семантическую релевантность формализации через использование системы сравнительных отношений между анализируемыми критериями. Особую значимость данный подход приобретает в контексте развития интеллектуальных аналитических систем, где требуется обеспечение методологической строгости процедур обработки экспертных оценок и их последующей интеграции в алгоритмические решения [3].

Актуальность настоящего исследования обусловлена необходимостью разработки методологически корректных процедур цифровизации качественных суждений в количественные репрезентации, обеспечивающих повышение надежности и валидности принимаемых решений в условиях многокритериальности.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Проведенный анализ методологических оснований подхода С. А. Пиявского в сравнении с методом анализа иерархий Т. Саати выявил существенные преимущества первого в аспекте обеспечения математической строгости процедур измерений [1, 2]. В ходе исследования была разработана концептуальная схема метода уверенных суждений, основанная на последовательном применении системы сравнительных операций. Процедура шкалирования реализуется через построение измерительной шкалы, которая выступает математической моделью системы экспертных предпочтений.

Использованная теоретическая модель цифровизации позволяет осуществлять корректное преобразование качественных суждений в форме оценок значениями порядковой шкалы с использованием раз и навсегда рассчитанных табличных значений. В отличие от метода анализа иерархий, где используется фиксированная шкала силы предпочтений, метод Пиявского предусматривает порядковые шкалы с теоретически любым количеством различных значений, что повышает гибкость процедуры измерений [2]. Доказано, что предложенная методологическая схема обеспечивает необходимую математическую строгость измерительной процедуры и элиминирует характерные для традиционных методов методологические артефакты [1].

Эмпирическая апробация предложенного подхода продемонстрировала его эффективность в условиях решения прикладных задач многокритериального выбора. Особое внимание в исследовании уделено анализу возможностей интеграции предложенного методологического подхода в современные системы искусственного интеллекта, где требуется обеспечение содержательной интерпретируемости результатов машинного обучения и экспертного оценивания [3].

ВЫВОДЫ

Теоретическая значимость проведенного исследования заключается в разработке методологически обоснованного аппарата цифровизации качественных суждений, представляющего альтернативу традиционным методам, включая метод анализа иерархий Т. Саати [1, 2]. Установлено, что концепция Пиявского успешно преодолевает ключевые методологические ограничения, связанные с недостаточной обоснованностью шкал относительной важности и проблемой несогласованности экспертных оценок. Практическая ценность работы состоит в создании теоретического фундамента для построения более надежных и валидных систем поддержки принятия решений, обеспечивающих содержательную интерпретацию результатов количественного анализа [3]. Перспективным направлением представляется адаптация метода для задач стратегического планирования и проектного управления, а также разработка специализированных модулей для отраслевого применения в финансовой сфере и управлении человеческими ресурсами с учетом специфики предметных областей.

Внедрение разработанных принципов цифровизации качественных суждений будет способствовать развитию более строгих и методологически корректных процедур многокритериальной оценки, соответствующих требованиям современной цифровой экономики и обеспечивающих повышение качества управленческих решений на основе математически строгой обработки экспертных предпочтений. Полученные результаты создают основу для разработки комплексных методик анализа и оптимизации бизнес-процессов в различных секторах экономики.

Список источников

1. Пиявский С. А., Малышев, В. В. Новые методы принятия многокритериальных решений в цифровой среде. Москва : Наука, 2022. 370 с. ISBN 978-5-02-040885-2.
2. Пиявский, С. А. Как «нумеризовать» понятие «важнее». DOI: 10.18287/2223-9537-2016-6-4-414-435 // Онтология проектирования. 2016. Т. 6, № 4. С. 414–435.

3. Перфельев Д.А. Интеллектуальные системы поддержки принятия решений: учебное пособие. . А. Перфильев, К. В. Раевич, А. В. Пятаева ; Сиб. федер. ун-т, Ин-т космич. и информ. технологий. - Красноярск : СФУ, 2018. - 134 с. : ил., схемы. - Библиогр.: с. 125-134. - 100 экз. - ISBN 978-5-7638-4011-7 : 233.00 р. - Изд. № 2018-6437. - Текст : непосредственный + Текст : электронный.

АЛГОРИТМ КОМПЕНСАЦИИ МНОГОЛУЧЕВЫХ ИСКАЖЕНИЙ В СИСТЕМАХ ЦИФРОВОЙ СВЯЗИ

ЛЕВОЧКИН Иван Максимович, студент
Омский государственный технический университет
644086, Россия, Омск, ivanlevockin6@gmail.com

НАЗРУК Елена Маратовна, доцент
Омский государственный технический университет
644105, Россия, Омск, elmarnaz@mail.ru

ВОРОНЦОВ Андрей Михайлович, студент
Омский государственный технический университет
44105, Россия, Омск, amvorontsov@st.omgtu.ru

Аннотация. Цель работы – моделирование искажающего влияния многолучевого распространения в канале связи и разработка алгоритма адаптивного эквалайзера на основе метода наименьших квадратов (LMS). Приводятся результаты математического моделирования, демонстрирующие снижение коэффициента битовых ошибок (BER) после применения предложенного алгоритма.

Ключевые слова: цифровая связь, многолучевое распространение, эквалайзер, алгоритм LMS, BER (Bit Error Rate).

ALGORITHM FOR COMPENSATING MULTIPATH DISTORTIONS IN DIGITAL COMMUNICATION SYSTEMS

Levockin Ivan Maximovich, student
Omsk State Technical University
644086, Russia, Omsk, ivanlevockin6@gmail.com

NAZARUK Elena Maratovna, Associate Professor
Omsk State Technical University
644105, Russia, Omsk, elmarnaz@mail.ru

VORONOV Andrey Mikhailovich, student
Omsk State Technical University
44105, Russia, Omsk, amvorontsov@st.omgtu.ru

Abstract. The purpose of the work is to model the distorting effect of multipath propagation in a communication channel and develop an adaptive equalizer algorithm

based on the least mean squares method (LMS). The results of mathematical modeling are presented, demonstrating a reduction in the bit error rate (BER) after applying the proposed algorithm.

Keywords: digital communication, multipath propagation, equalizer, LMS algorithm, BER (Bit Error Rate).

ВВЕДЕНИЕ

В системах цифровой связи сигналы часто искажаются из-за многолучевого распространения – когда волна отражается от зданий, рельефа или других объектов и приходит к приемнику по нескольким путям с разными задержками. Это приводит к наложению сигналов, помехам и ошибкам в передаче данных. Для компенсации таких искажений используются эквалайзеры – устройства, которые выравнивают канал, восстанавливая исходный сигнал. Адаптивные эквалайзеры, работающие по методу наименьших квадратов (LMS – least mean squares), автоматически подстраиваются под изменения канала [1, 2].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Алгоритм компенсации построен на модели многолучевого канала, где сигнал проходит через несколько путей с коэффициентами затухания и задержками (типичная модель – 3–5 лучей с задержками до 10 мкс). Искажения вызывают межсимвольную интерференцию (ISI – когда части предыдущих символов мешают текущим). Эквалайзер на базе LMS работает как FIR-фильтр (конечная импульсная характеристика) с коэффициентами w_n , которые обновляются по правилу: $w_{new} = w_{old} + \mu \cdot e \cdot x$, где μ – шаг адаптации (малое число, например 0,01), e – ошибка (разница между желаемым и полученным сигналом), x – входной вектор [3, 4].

Математическое моделирование проведено для QPSK-модуляции (квадратурная фазовая манипуляция – простой способ кодирования данных фазой волны) при шуме AWGN (аддитивный белый гауссов шум – случайные помехи, равномерно распределенные по частотам). Канал моделируется как FIR-фильтр

с импульсной характеристикой $h = [1, 0,5, 0,3]$ (основной луч + два отражения). BER (bit error rate – коэффициент битовых ошибок, доля неверно принятых битов) рассчитывается по формуле для QPSK в fading-канале $BER \approx \frac{1}{2} \cdot \operatorname{erfc}(\sqrt{\frac{SNR}{2}})$, скорректированной на ISI, где SNR – отношение сигнал/шум, erfc – дополнительная функция ошибок.

Без эквалайзера при SNR = 10 дБ и delay 5 мкс BER достигает 0,15–0,20 из-за сильной ISI. С LMS-эквалайзером (длина фильтра 16 тапов, $\mu = 0,005$) коэффициенты сходятся за 100–200 итераций, снижая BER до 0,02–0,03. При SNR = 15 дБ выигрыш в BER — в 5–7 раз (с 0,08 до 0,01). Для сложного канала (5 лучей) добавляется предсказание ошибки: $e_n = d_n - y_n$, где d – желаемый символ, y – выход эквалайзера [5, 6].

Эквалайзер интегрируется в приемник: входной сигнал фильтруется, коэффициенты обновляются в реальном времени. В условиях движения (доплеровский сдвиг 100 Гц) адаптация μ корректируется динамически, чтобы избежать расходимости.

ВЫВОДЫ

Предложенный алгоритм на основе LMS эффективно компенсирует многолучевые искажения в цифровых системах связи, снижая BER в 5–10 раз по сравнению с некомпенсированным каналом. Моделирование подтверждает простоту реализации на DSP-процессорах и применимость для мобильных сетей вроде 4G/5G. В будущем целесообразно комбинировать с MIMO (многочисленные антенны) для дальнейшего улучшения [7–10].

Список источников

1. Григорьев И.А., Ларионова А.В. Адаптивный DLMS-эквалайзер на базе современной ПЛИС // Радиотехника. 2023. Т. 87. № 9. С. 54-65. DOI: <https://doi.org/10.18127/j00338486-202309-05>.
2. Халиуллин Р.Ф., Сулимов А.И. Оценка вклада многократно рассеянных радиоволн в импульсную характеристику канала беспроводной связи.

Ученые записки Казанского университета. Серия Физико-математические науки. 2024;166(4):624-638. <https://doi.org/10.26907/2541-7746.2024.4.624-638>.

3. Паршин А.Ю., Нгуен Ван Хань. Оценка пропускной способности ММО-системы связи при погрешности оценки канальной матрицы и наличии рассеивателей // Радиотехника. 2026. Т. 90. № 1. С. 84–93. DOI: <https://doi.org/10.18127/j00338486-202601-08>.

4. Бойко И.А., Глушанков Е.И., Лялина А.Ж. Алгоритмы адаптивной обработки сигналов в геостационарных системах. Труды учебных заведений связи. 2025;11(5):74-83. <https://doi.org/10.31854/1813-324X-2025-11-5-74-83>.

5. Zhang, Z.; Li, Y.; Nima, B. Digital Finite Impulse Response Equalizer for Nonlinear Frequency Response Compensation in Wireless Communication. Electronics 2023, 12, 2010. <https://doi.org/10.3390/electronics12092010>.

6. G. Cetinel And C. VURAL, «Адаптивное слепое выравнивание для ММО-системы хаотической связи», TURKISH JOURNAL OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMPUTER SCIENCES , vol.28, №2, стр.591–605, 2020.

7. Валиуллин, Д. Р. Турбо-эквалайзер с прекодером в многолучевом канале / Д. Р. Валиуллин, П. Н. Захаров // Цифровая обработка сигналов и ее применение. DSPA - 2020 :Доклады на 22-ой Международной конференции, Москва, 14–15 апреля 2020 г.—Москва: Российское научно-техническое общество радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова, 2020. – С. 185-190.

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КЛАССИЧЕСКОГО OCR
И ВИЗУАЛЬНО-ЯЗЫКОВЫХ МОДЕЛЕЙ В ЗАДАЧАХ
РАСПОЗНОВАНИЯ ТЕКСТОВОЙ ИНФОРМАЦИИ**

ЛЬВОВ Иван Вячеславович, специалист
департамента разработки технологий анализа данных
ООО «Открытый код»
443001, Россия, Самара, lvoff2002@mail.ru

ГУСАРОВ Максим Евгеньевич, специалист
департамента разработки технологий анализа данных
ООО «Открытый код»
443001, Россия, Самара, ya.maxim-gusarov@yandex.ru

МАРДГАЛИМОВ Ильдар Раильевич, специалист
департамента разработки технологий анализа данных
ООО «Открытый код»
443001, Россия, Самара, silwercold@gmail.com

ФЕДУЛОВ Александр Михайлович, специалист
департамента разработки технологий анализа данных
ООО «Открытый код»
443001, Россия, Самара, sanofedulov2002@mail.ru

ДУСЕНБАЕВ Амиржан Эдуардович, специалист
департамента разработки технологий анализа данных
ООО «Открытый код»
443001, Россия, Самара, dusenbaev101@gmail.com

Аннотация. Проведен сравнительный анализ традиционной технологии оптического распознавания текста (OCR) и современной визуально-языковой модели Gemma-12B в задачах извлечения текстовой информации из изображений. Показано, что визуально-языковая модель обеспечивает более высокое качество распознавания по сравнению с классическим OCR. Приведены ключевые метрики распознавания и продемонстрировано преимущество подхода, объединяющего обработку изображений и естественного языка. Результаты исследования подтверждают перспективность применения мультимодальных моделей для OCR-задач и намечают направления дальнейшего развития технологий распознавания текста.

Ключевые слова: оптическое распознавание символов, визуально-языковая модель, Tesseract, Gemma 3, точность распознавания текста, сравнительный анализ.

COMPARATIVE ANALYSIS OF CLASSICAL OCR AND VISION-LANGUAGE MODELS IN TEXT RECOGNITION TASKS

LVOV Ivan Vyacheslavovich, Specialist
at the Department of Data Analysis Technology Development
Open Code
443001, Russia, Samara, lvoff2002@mail.ru

GUSAROV Maxim Evgenevich Specialist
at the Department of Data Analysis Technology Development
Open Code
443001, Russia, Samara, ya.maxim-gusarov@yandex.ru

MARDGALIMOV Ildar Railevich, Specialist
at the Department of Data Analysis Technology Development
Open Code
443001, Russia, Samara, silwercold@gmail.com

FEDULOV Alexander Mikhailovich, Specialist
at the Department of Data Analysis Technology Development
Open Code
443001, Russia, Samara, sanofedulov2002@mail.ru

DUSENBAEV Amirzhan Eduardovich, Specialist
at the Department of Data Analysis Technology Development
Open Code
443001, Russia, Samara, dusenbaev101@gmail.com

Abstract. A comparative analysis of the traditional optical character recognition (OCR) technology and the modern vision-language model Gemma-12B was conducted for tasks involving the extraction of textual information from images. It is shown that the vision-language model provides higher recognition quality compared to classical OCR. Key recognition metrics are presented, and the advantages of an approach that integrates image processing with natural-language understanding are demonstrated. The results of the study confirm the promise of applying multimodal models to OCR tasks and outline directions for further development of text-recognition technologies.

Keywords: optical character recognition, vision-language model, Tesseract, Gemma 3, text recognition accuracy, comparative analysis.

ВВЕДЕНИЕ

Оптическое распознавание символов (OCR) необходимо для преобразования печатного или рукописного текста в электронный формат. Это полезно в цифровых архивах и системах управления документами [1]. За десятки лет создано много OCR-систем, от простых алгоритмов машинного зрения до современных нейронных сетей [2–3]. Tesseract – известный OCR-движок с открытым исходным кодом, но его работа сильно зависит от качества изображения. Например, шум, необычные шрифты или сложная структура документа могут ухудшить результаты. В последнее время появились большие визуально-языковые модели. Они могут выполнять OCR, используя нейросетевые представления, а не строгие алгоритмы. Эти модели, обученные на больших объемах данных (включая изображения с текстовыми описаниями), научились читать текст, воспринимая его как часть изображения. Таким образом, возникает научный и прикладной интерес: насколько эффективна большая визуально-языковая модель по сравнению с традиционным OCR при извлечении самого текста.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В рамках настоящего исследования выполнена количественная оценка точности распознавания текста на изображениях с применением как классического OCR-движка, так и современной визуально-языковой модели. В качестве примера рассматриваются Tesseract (классический OCR) и Gemma 3 12B (визуально-языковая модель). Сравнение происходит следующим образом: обе системы получают идентичные изображения текста на входе, а на выходе выдают текстовую строку (результат распознавания). Оригиналы текстов известны и используются как эталон для вычисления метрик качества.

Для оценки результатов применяются распространенные в OCR-области метрики ошибок и точности. CER (Character Error Rate) – доля ошибок на уровне символов, вычисляемая как отношение суммы вставок, удалений и замен

символов к общему числу символов в эталоне. WER (Word Error Rate) – аналогичная метрика на уровне слов, показывающая долю искаженных слов в итоговом тексте. Обе эти метрики тем ниже, чем более точно система распознала текст (нулевые значения соответствуют полному совпадению с эталоном). Дополнительно оцениваются интегральные показатели: Exact Match (доля случаев, когда распознанный текст полностью совпал с оригиналом без единой ошибки) и Similarity (обобщенная мера схожести распознанного текста с эталонным, лежащая в диапазоне $[0, 1]$, где 1 означает идентичность, а 0 – полное расхождение).

Таким образом, задача эксперимента – оценить показатели обеих систем (Tesseract и Gemma 12B) на общем наборе тестовых изображений, чтобы сравнить их и определить, какой подход лучше.

Сводные количественные показатели работы обеих систем представлены на диаграмме (рис. 1) и в табл. 1.

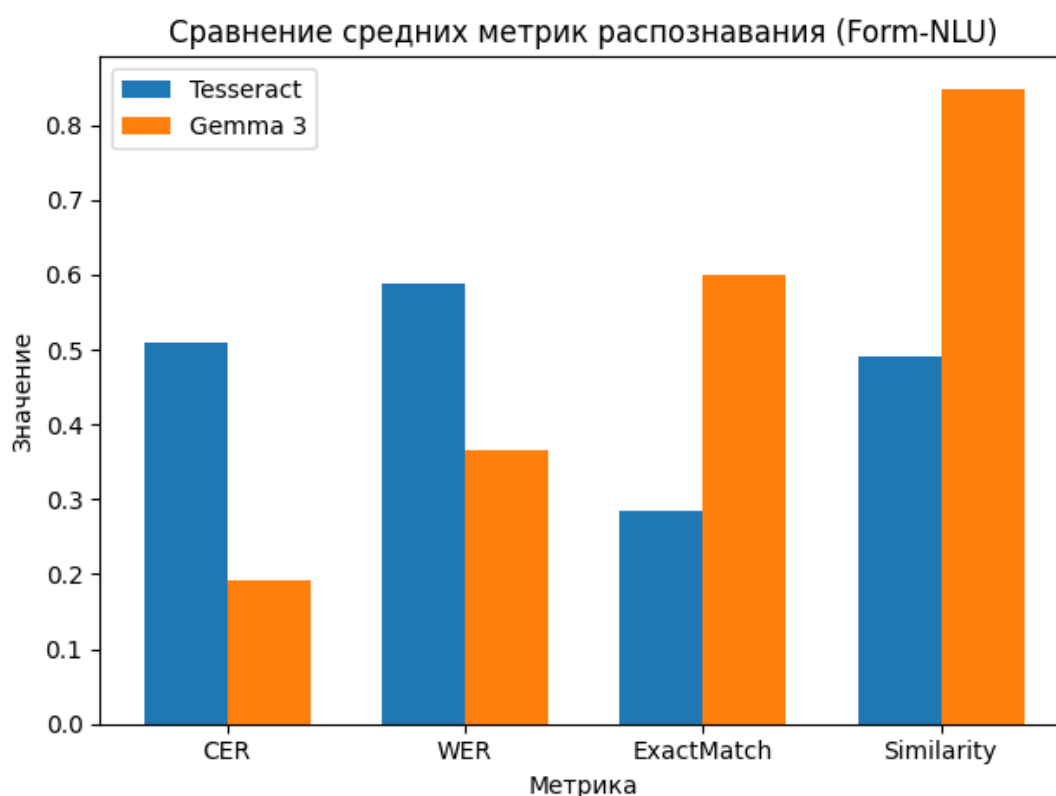


Рис. 1. Сравнение средних метрик распознавания

Движок Tesseract продемонстрировал на тестовом корпусе достаточно высокий уровень ошибок: его CER составил 0,5096 (то есть около 51 % символов

распознаны неверно или пропущены), а WER – 0,5889 (почти 59 % слов содержат хотя бы одну ошибку). Показатель Exact Match для Tesseract равен лишь 0,285, что означает: полностью безошибочно распознать весь текст на изображении удалось лишь в 28,5 % случаев. Средняя мера схожести распознанного текста с оригиналом (Similarity) достигла 0,4914 (49,14 %), отражая существенные искажения контента в выходных данных Tesseract.

Таблица 1

Итоговые метрики точности распознавания текста

Модель	CER	WER	Exact Match	Similarity
Tesseract	0,5096	0,5889	0,285	0,4914
Gemma 3 12B	0,1919	0,3647	0,6	0,8485

Модель Gemma 3 12B существенно превосходит OCR-движок по всем метрикам. Ее CER равен 0,1919, что почти в 2,7 раза ниже, чем у Tesseract (около 19 % ошибочных символов). WER модели Gemma составляет 0,3647 (примерно 36,5 %), что указывает на заметно более точное распознавание слов. Полное совпадение всего текста с эталоном (Exact Match) достигнуто в 60 % случаев. Наконец, интегральный показатель Similarity для Gemma 12B равен 0,8485, свидетельствуя о том, что выходной текст в среднем на ~85 % совпадает с оригинальным – значительно лучше, чем ~49 % у OCR.

ВЫВОДЫ

Проведенное сравнение подтверждает, что современная визуально-языковая модель Gemma 3 12B намного точнее распознает текст, чем обычный OCR-движок. Gemma 3 лучше понимает контекст и языковые правила, поэтому допускает меньше ошибок (CER и WER) и чаще правильно распознает целые фрагменты текста по сравнению с Tesseract. Данный результат согласуется с отдельными исследованиями, отмечающими, что мультимодальные LLM при правильной настройке могут не только догнать, но и превзойти специализированные OCR-системы на сложных данных (например, исторические рукописи) за счет встроенного «понимания» контекста [4–5]. В действительности использование

больших генеративных моделей позволяет по-новому взглянуть на задачи обработки текста. Это дает возможность объединить функции извлечения текста с последующим анализом его содержания в рамках единого подхода.

Список источников

1. Капранчикова А. А., Клевцова А. С. Обзор средств оптического распознавания текста на примере задачи оцифровки русскоязычных архивных журналов // Современные информационные технологии. 2021. Т. 4. С. 26–33.
2. Smith R. An Overview of the Tesseract OCR Engine. DOI: 10.1109/ICDAR.2007.4376991 // 9th Int. Conf. on Document Analysis and Recognition (ICDAR 2007). IEEE, 2007. P. 629-633. The electronic version of print. URL: <https://tesseract-ocr.github.io/docs/tesseract-icdar2007.pdf>. (date of request: 15.11.2025).
3. TrOCR: Transformer-based Optical Character Recognition with Pre-trained Models / Li M. et al. DOI: 10.1609/aaai.v37i11.26538 // Proceedings AAAI Conference on Artificial Intelligence. 2023. URL: <https://ojs.aaai.org/index.php/AAAI/article/view/26538> (date of request: 15.11.2025).
4. GPT-4 Technical Report / OpenAI // arXiv. URL: <https://arxiv.org/abs/2303.08774> (date of request: 15.11.2025).
5. OCR-free Document Understanding Transformer / Kim G. et al. DOI:10.1007/978-3-031-19815-1_29 // Computer Vision (ECCV 2022). 2022. P.498-517.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ПЕРЕДАЧИ СТРУКТУРИРОВАННЫХ ДАННЫХ В КОРПОРАТИВНЫХ СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОННОГО ДОКУМЕНТООБОРОТА

ЛЯПИНА Ксения Владимировна, старший преподаватель
высшей школы передовых производственных технологий
Поволжский государственный университет сервиса
445017, Россия, Тольятти, kvsafironova@yandex.ru

Аннотация. Актуальность статьи обусловлена тем, что мониторинг и анализ процессов, которые автоматизируются программными продуктами, способствует оперативному движению документов, которые необходимы в условиях производственных процессов компании. Целью является исследование и реализация механизмов создания документов на основе заранее заданных шаблонов. Использование генератора документов по шаблонам приведет к сокращению количества кода в проекте, времени на тестирование продукта, генерирующего документы по шаблону.

Ключевые слова: документооборот, генератор, шаблон, база данных, макрос, держатель, интеграция.

RESEARCH OF METHODS FOR TRANSFERRING STRUCTURED DATA IN CORPORATE ELECTRONIC DOCUMENT MANAGEMENT SYSTEMS

LYAPINA Ksenia Vladimirovna, Senior Lecturer
Higher School of Advanced Manufacturing Technologies
Volga Region State University of Service
445017, Russia, Togliatti, kvsafironova@yandex.ru

Abstract. The relevance of the article is due to the fact that monitoring and analysis of processes that are automated by software products contributes to the prompt movement of documents that are necessary in the conditions of production processes of the company. The purpose is to study and implement mechanisms for creating documents based on predefined templates. The use of a template-based document generator will reduce the amount of code in the project

and the time required to test the product that generates documents based on a template.

Keywords: document management, generator, template, database, macro, holder, integration.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время документооборот представляет собой процесс движения документов, который начинается с момента их получения или создания до момента завершения и исполнения, обработки и т. д.

В связи с этим существует ряд организаций, представляющих услуги и программные продукты, цель которых —оказать помощь в процессе осуществления документооборота организации, тем самым свести к минимуму её затраты. Продукты компании позволяют управлять процессами, составлять отчеты и документы. Но каждый документ имеет свою специфику, и их необходимо отдельно прорабатывать и дополнять, а в некоторых случаях переписывать код для формирования данного документа.

Процесс создания отдельного кода для новых и нетипичных документов приводит к значительному увеличению затрат для компании-заказчика.

Поэтому целью исследования является реализация механизмов создания документов на основе заранее заданных шаблонов, способствующих сокращению времени на подготовку необходимых документов, а также уменьшению количества ошибок в них.

Среди уже имеющихся программных средств рассматривались такие варианты, как phpDocumentor, docsify, optimy. Все они имеют свои весомые достоинства, но они довольно жестки по функционалу и скованы в плане изменений, расширения и добавления новых документов [1].

Поэтому для решения проблемы гибкости подобных продуктов было решено применить метод по внедрению генератора документов по шаблонам, который приведет к сокращению количества кода в проекте, времени на тестирование продукта, генерирующего документы по шаблону.

Процесс генерации документа прост – пользователь нажимает в системе кнопку сгенерировать документ, система определяет нужный шаблон по предустановленным настройкам, необходимый шаблон попадает в компонент по генерации и конвертации документа, выдает сгенерированный документ и автоматически загружается в виде файла в браузер пользователя [2] (рис. 1).

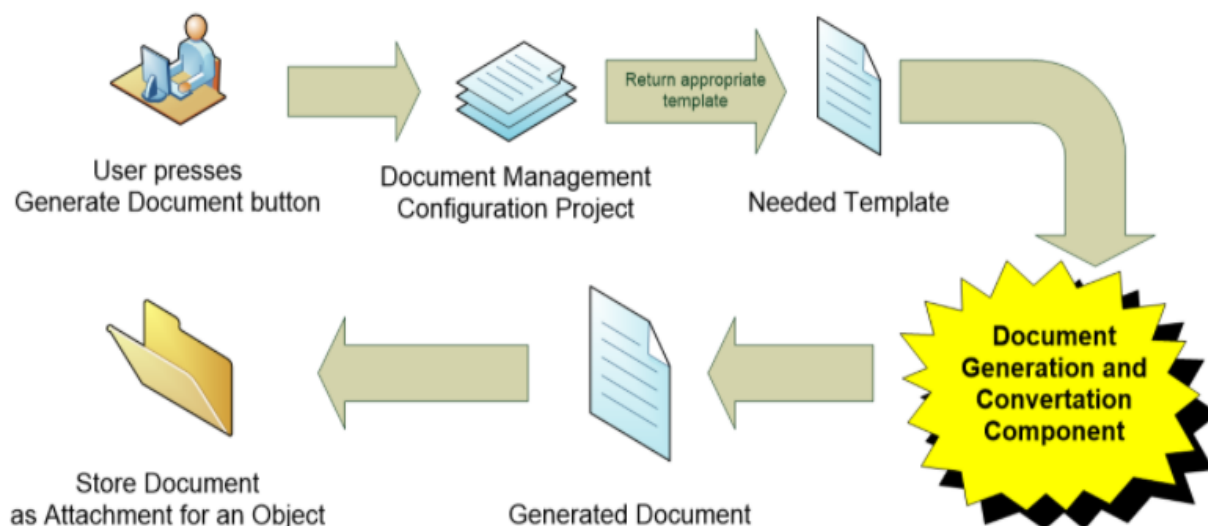


Рис. 1. Схема процесса обработки шаблона данными

Одной из важных частей функционала генератора документов является возможность конвертирования документов в формате PDF.

Для решения проблемы конвертации существующего файла в нужный формат было решено проанализировать существующие фреймворки на способность качественно и без потерь данных конвертировать DOCX файлы в PDF.

Были рассмотрены: Apache POI, XtremeDocumentStudio, JAVA библиотека docx4j, GroupDocs.Conversion, Aspose.Words [3].

В результате решили использовать библиотеку jasper для создания pdf файла напрямую.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Были рассмотрены и проанализированы проблемы, недостатки и достоинства существующих программных аналогов реализации документооборота, составлены требования для генератора документов на основе шаблона, спроектированы логическая и физическая модель данных, составлена архитектура

проекта, было составлено подробное описание интеграции генератора документов в программный код проекта.

ВЫВОДЫ

Данный генератор документов по шаблонам не имеет четких аналогов, за счет чего является уникальным решением для упрощения создания документов, используя шаблоны.

Список источников

1. Ксенофонов Н. В., Иванова И. А., Котилевец И. Д. Кроссплатформенная среда исполнения программного обеспечения : учебно-методическое пособие. Москва : РТУ МИРЭА, 2023. 110 с. // Лань : электронно-библиотечная система. URL: <https://e.lanbook.com/book/329021> (дата обращения: 19.10.2025). Режим доступа: для зарегистрир. пользователей.

2. Кузнецов В. Н., Кривоносов В. А., Есилевский В. С. Средства автоматизации и управления : учебник. 2-е изд. Старый Оскол : ТНТ, 2023. 354 с. ISBN 978-5-94178-545-2.

3. Черникова С. А., Пестриков С. А. Сетевые технологии и электронный документооборот : методические рекомендации. Пермь : ПГАТУ, 2024. 32 с. // Лань : электронно-библиотечная система. URL: <https://e.lanbook.com/book/440498> (дата обращения: 09.09.2025). Режим доступа: для зарегистрир. пользователей.

4. Курбатова И. В., Печкуров А. В. Основы программирования на языке Java : учебное пособие для вузов. Санкт-Петербург : Лань, 2024. 348 с. // Лань : электронно-библиотечная система. URL: <https://e.lanbook.com/book/385928> (дата обращения: 01.11.2025). Режим доступа: для зарегистрир. пользователей.

5. Хернандес М. Дж., Вьескас Д. Л. SQL-запросы для простых смертных. Практическое руководство по манипулированию данными в SQL. Москва : ЛОРИ, 2019. 480 с. ISBN 978-5-85582-355-4.

6. Маркин А. В. Построение запросов и программирование на SQL : учебное пособие. Москва : Диалог-Мифи, 2008. 384 с. // Книгогид : сайт. URL:

<https://knigogid.ru/books/1893131-postroenie-zaprosov-i-programmirovanie-na-sql/toread> (дата обращения: 01.10.2025).

7. Хабитуев Б. В. Программирование на языке Java: практикум : учебное пособие. Улан-Удэ : БГУ, 2020. 94 с. // Лань : электронно-библиотечная система. URL: <https://e.lanbook.com/book/171791> (дата обращения: 11.10.2025).

8. Самохина Н. С., Ефремов А. С. Алгоритмические методы событийно-прогнозного управления качеством сложных систем обработки данных: интеграция системного анализа и вычислительного моделирования. DOI 10.33693/2313-223X-2025-12-2-75-81 // Computational Nanotechnology. 2025. Т. 12, № 2. С. 75-81.

9. Шилдт Г. Java. Полное руководство. 12 изд. Санкт-Петербург : Диалектива, 2023. 1184 с. URL: <https://djvu.online/file/LKMcAz8DMHvkG?ysclid=mhru4q6six911158878> (дата обращения: 15.10.2025).

**СЕМАНТИКО-ЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОД
К РАСПОЗНАВАНИЮ ОБРАЗОВ НА ОСНОВЕ
ОНТОЛОГИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ**

МАВРИН Владислав Александрович, магистрант
*Поволжский государственный университет
телекоммуникаций и информатики
443115, Россия, Самара, vlad_mavrin_2015@mail.ru*

СМИРНОВ Сергей Викторович,
доктор технических наук, доцент, профессор кафедры
информатики и робототехнических систем
*Поволжский государственный университет
телекоммуникаций и информатики
443090, Россия, Самара, sergvic@list.ru*

Аннотация. Статья посвящена преодолению проблемы семантического разрыва в задачах распознавания образов. Предлагается подход на основе онтологических моделей и морфологического пространства, позволяющий учитывать смысловые связи между признаками объектов. Метод демонстрирует устойчивую работу с неполными и противоречивыми данными, превосходя традиционные алгоритмы. Разработанное решение особенно перспективно для экспертных систем, требующих прозрачной логики принятия решений.

Ключевые слова: распознавание образов, семантический разрыв, онтологический анализ, морфологическое пространство, экспертные системы.

**A SEMANTIC-LOGICAL APPROACH TO PATTERN
RECOGNITION BASED ON ONTOLOGICAL MODELS**

MAVRIN Vladislav Aleksandrovich, Master's student
*Povolzhsky State University of Telecommunications and Informatics
443115, Russia, Samara, vlad_mavrin_2015@mail.ru*

SMIRNOV Sergey Victorovich,
Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Associate
Professor at the Department of Computer Science and Robotic Systems
*Povolzhsky State University of Telecommunications and Informatics
443090, Russia, Samara, sergvic@list.ru*

Abstract. The article addresses the problem of the semantic gap in pattern recognition tasks. An approach based on ontological models and morphological space is proposed, enabling the consideration of semantic relationships between object features. The method demonstrates robust performance with incomplete and contradictory data, outperforming traditional algorithms. The developed solution is particularly promising for expert systems requiring transparent decision-making logic.

Keywords: pattern recognition, semantic gap, ontological analysis, morphological space, expert systems.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время традиционные методы распознавания образов [1–5] все чаще оказываются неэффективными при работе со сложными, слабоструктурированными данными. Особую проблему представляет так называемый «семантический разрыв», когда система технически корректно определяет признаки объектов, но не понимает их смысловых связей и контекстных отношений [6, 7]. Эта проблема особенно остро проявляется в таких областях, как анализ исторических артефактов [8], диагностика сложных технических систем [9], медицинская диагностика, где важны не только статистические закономерности, но и смысловые связи между признаками.

Практическая ценность данного исследования заключается в создании методики, которая позволяет компьютеру «понимать» смысловые отношения между объектами, а не просто статистически обрабатывать их признаки [6–8]. Это открывает новые возможности для работы с неполными и противоречивыми данными, где традиционные методы часто дают сбой.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В основе подхода лежит идея представления знаний о предметной области в виде специальной семантической сети – морфологического пространства. Здесь описывается не просто набор признаков, а система взаимосвязанных понятий с правилами их сочетаемости [6, 7, 9].

Например, при анализе археологического артефакта учитывается не только его физические характеристики, но и смысловые ограничения: определенный тип орнамента может быть характерен только для конкретной исторической эпохи, некоторые элементы декора никогда не встречаются вместе в одном артефакте [10].

Были введены два типа смысловых ограничений:

- Отношения обусловленности (когда наличие одного признака требует наличия другого).
- Отношения несовместимости (когда признаки не могут встречаться вместе).

На практике это выглядит как система правил, которые направляют процесс распознавания, исключая заведомо невозможные варианты [8, 9]. Если при раскопках найден предмет с характерными чертами X и Y, а наши онтологические правила говорят, что такие черты несовместимы, система не станет перебирать все возможные комбинации, а сразу сфокусируется на поиске ошибки в данных или необходимости уточнения правил [9, 10].

В ходе экспериментов сравнивали данный подход с традиционными методами [1–5] на нескольких тестовых задачах. В условиях неполных данных (когда до 30 % информации отсутствовало) метод показал значительно лучшие результаты – там, где статистические алгоритмы давали случайные ответы, система сохраняла разумные гипотезы благодаря пониманию смысловых связей между признаками [6–9].

ВЫВОДЫ

Проведенная работа позволяет сделать следующие выводы:

1. Предложенный семантико-логический подход действительно позволяет преодолеть проблему «семантического разрыва» в задачах распознавания образов [6, 8], особенно при работе с неполными и противоречивыми данными.
2. Использование онтологических моделей предметной области в сочетании с морфологическим анализом создает эффективный механизм для сужения

пространства поиска и отбраковки семантически некорректных гипотез [7–9].

3. Практические испытания подтвердили, что метод сохраняет работоспособность в условиях, когда традиционные алгоритмы распознавания демонстрируют резкое падение точности [1–5].

4. Разработанный подход может быть особенно полезен в экспертных системах, где важно не только классифицировать объект, но и понять логику принятия решения, что обеспечивается прозрачностью онтологических правил [8, 9].

Перспективным направлением дальнейших исследований считаем разработку методов автоматического обучения и корректировки онтологических моделей на основе новых данных, а также создание гибридных систем, сочетающих смысловой анализ с современными глубокими learning-технологиями.

Список источников

1. Горелик А. Л., Скрипкин В. А. Методы распознавания : учеб. пособие. 2-е изд. перераб. и доп. Москва : Высш. шк., 1984. 208 с.
2. Белозёрский Л. А. Введение в системы автоматического распознавания. Киев : Наук. думка, 2005. 434 с.
3. Попова Л. П. Обзор существующих методов распознавания образов // Информационные технологии и системы : сб. науч. тр. Москва : МГУПИ, 2007. С. 45-52.
4. Чабан Л. Н. Теория и алгоритмы распознавания образов : учеб. пособие. Москва : МИИГАиК, 2004. 71 с.
5. Зенин А. В. Анализ методов распознавания образов // Молодой ученый. 2017. № 16 (150). С. 125-130.
6. Боргест Н. М. Распознавание образов при создании артефактов как метафора и как прикладные технологии онтологии проектирования // Онтология проектирования. 2015. № 1 (15). С. 19-29.
7. Гуревич И. Б. Тезаурус и онтология предметной области «Анализ изображений» // Труды Всероссийской научной конференции «Национальная

информационно-аналитическая система поддержки научных исследований». Москва : ИПМ им. М. В. Келдыша РАН. 2008. С. 94-108.

8. Журевич А. И., Олизарович Е. В., Родченко В. Г. Использование онтологий при построении систем распознавания образов // Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем : материалы Междунар. науч.- техн. конф. (OSTIS-2012). Минск : БГУИР, 2012. С. 321-324.

9. Семенова В. А., Смирнов С. В. Модели и методы онтологического анализа данных в задаче структурного анализа и синтеза технических решений // Онтология проектирования. 2023. Т. 13. № 4. С. 531-547.

10. Шпирко С. В. Логика распознавания А. Д. Закревского на примере задачи восстановления пропусков в историко-археологических исследованиях // Историческая информатика. Информационные технологии и математические методы в исторических исследованиях и образовании 2014. № 1(7). С. 62-69.

ИССЛЕДОВАНИЕ СЕТЕВОГО ПРОТОКОЛА DSR

МАЛАХОВ Сергей Валерьевич, кандидат технических наук,
доцент, доцент кафедры информатики и робототехнических систем

*Поволжский государственный университет
телекоммуникаций и информатики
443124, Россия, Самара, malakhov.sv@psuti*

АНДРЕЕВ Александр Сергеевич, магистрант

*Поволжский государственный университет
телекоммуникаций и информатики
443124, Россия, Самара, sasha1326620@gmail.com*

Аннотация. В статье рассматривается исследование сетевого протокола Dynamic Source Routing (DSR), используемого для маршрутизации в мобильных ad-hoc сетях (MANET). Протокол DSR является реактивным и обеспечивает поиск маршрутов и их обслуживание по мере необходимости, что позволяет эффективно функционировать в условиях динамично меняющихся сетевых топологий.

Ключевые слова: маршрутизация, поиск маршрутов, обслуживание маршрутов, накладные расходы, кэширование маршрутов.

RESEARCH OF THE DSR NETWORK PROTOCOL

MALAKHOV Sergey Valerievich, Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor, Associate Professor at the Department

*of Computer Science and Robotic Systems
Volga State University of Telecommunications and Informatics
443124, Russia, Samara, malakhov.sv@psuti*

ANDREEV Alexander Sergeevich, Master's student

*Volga State University of Telecommunications and Informatics
443124, Russia, Samara, sasha1326620@gmail.com*

Abstract. This article examines the Dynamic Source Routing (DSR) network protocol used for routing in mobile ad-hoc networks (MANETs). DSR is reactive and provides route discovery and maintenance as needed, enabling efficient operation in dynamically changing network topologies.

Keywords: routing, route discovery, route maintenance, overhead, route caching.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования протокола DSR (Dynamic Source Routing) обусловлена растущими требованиями к эффективности и надежности беспроводных сетей, включая мобильные ad-hoc сети и сенсорные сети. В условиях быстрых изменений в области информационных технологий и коммуникаций протоколы маршрутизации играют ключевую роль в обеспечении качественного и стабильного обмена данными между устройствами в динамических и децентрализованных сетях. В особенности протокол DSR представляет собой важный элемент, способствующий оптимизации маршрутов передачи данных с учетом изменяющихся условий, таких как перемещение узлов или изменение их состояния [1, с. 3].

Новизна данного исследования заключается в углубленном анализе протокола DSR в контексте новых технологий и методов маршрутизации, которые стали актуальными в последние годы [2, с. 47]. В рамках исследования также рассматриваются вопросы совместимости протокола DSR с другими протоколами маршрутизации, такими как OLSR и AODV, что является важным для разработки гибридных моделей маршрутизации [3, с. 21]. Практическая значимость заключается в возможном применении результатов исследования для создания более устойчивых и эффективных маршрутизирующих алгоритмов, которые смогут работать в реальных условиях, например, в мобильных и сенсорных сетях [4, с. 50]. В числе ученых, внесших значительный вклад в исследование сетевых протоколов маршрутизации, можно выделить такие работы, как исследования Алфреда Т. Барса, Джеффри Шнайдера, Майкла Скофилда и других специалистов, которые проводили детальный анализ алгоритмов маршрутизации для мобильных сетей, в том числе в контексте протокола DSR.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Протокол DSR представляет собой реактивный (on-demand) механизм маршрутизации, ориентированный на сети без фиксированной инфраструктуры,

где узлы подвижны и топология может быстро меняться. Его ключевыми компонентами являются механизмы Route Discovery (поиск маршрута) и Route Maintenance (обслуживание маршрута). Протокол позволяет источнику данных включать полный «маршрут-снабжение» (source route) в заголовок пакета, т. е. последовательность промежуточных узлов, через которые пакет должен пройти. Это дает ряд преимуществ (например, простота предотвращения петель маршрутизации) и одновременно налагает определенные ограничения [5, с. 52]. В табл. 1 можно представить ключевые характеристики протокола DSR.

Таблица 1

Сравнительные характеристики и примеры

Характеристика	Значение / описание	Практический пример
Метод маршрутизации	Source routing: исходный узел вставляет полный путь в заголовки пакета	Узел А хочет отправить пакеты узлу Е, добавляет путь $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E$ в заголовок.
Поисковый механизм (Route Discovery)	При отсутствии маршрута исходник инициирует широковещательный RREQ, затем RREP от узла-назначения или узла с кэшем маршрута	Новая сессия между двумя мобильными узлами в MANET.
Обслуживание маршрута (Route Maintenance)	Узел-посредник, обнаруживший неисправную ссылку, посылает RERR к источнику, источник может регенерировать RREQ	Ссылка между узлами В и С разрывается; С посылает RERR, источник ищет новый путь.

Исследования показывают, что DSR демонстрируют хорошие результаты в условиях умеренной подвижности узлов и относительно небольших сетей. Так, в работе Abu Salem, Samara и Alhmiedat (2014) был проведен анализ производительности DSR с точки зрения коэффициента доставки пакетов (Packet Delivery Ratio), конечной задержки (end-to-end delay) и пропускной способности (throughput) при различных размерах кэша маршрутов и скоростях узлов [6, с. 99]. В частности, Seet, Lee & Lau (2006) предложили модификацию DSR с подавлением не оптимальных маршрутов (Non-Optimal Route Suppression), что позволяет снизить накладные расходы протокола и повысить эффективность

маршрутизации. Также есть исследования, связанные с оптимизацией DSR для высокоомобильных сред, например, протокол ASDSR (Adaptive Stable DSR) с механизмом ограничения распространения запросов (RREQ) для уменьшения «взрыва» широковещательных сообщений. Из практики: в исследовании «Optimized DSR Routing Protocol for Mobile Ad-Hoc Networks» утверждается снижение числа RREQ и контрольных пакетов примерно на 15 % и уменьшение общей энергии сети до 60 % при применении схемы O-DSR по сравнению с классическим DSR [7]. Протокол DSR благодаря своей способности адаптироваться к динамически меняющимся условиям сети продолжает оставаться актуальным инструментом маршрутизации. Однако, как и любой другой протокол, DSR имеет свои особенности и ограничения, которые могут влиять на его эффективность в разных условиях эксплуатации.

ВЫВОДЫ

Протокол DSR может страдать от увеличения накладных расходов, особенно при широковещательном поиске маршрута (Route Discovery). Это связано с необходимостью передачи пакетов RREQ и RREP, что увеличивает нагрузку на сеть, особенно в условиях высокой мобильности. Для решения этой проблемы необходимо внедрение более эффективных механизмов ограничения зоны распространения запросов, таких как zone-based flooding и Non-Optimal Route Suppression. Кэшированные маршруты могут становиться устаревшими из-за быстрого изменения топологии сети.

Список источников

1. Агайдарова А. Т., Туманбаева К. Х. Анализ протоколов маршрутизации в MANET // Наука и просвещение: актуальные вопросы, достижения и инновации : сборник статей VI Международной научно-практической конференции. Пенза : Наука и Просвещение, 2021. С. 68-72.
2. Махмуд А. Ш., Поляков В. М. Оценка производительности протоколов маршрутизации мобильных ad-hoc сетей (MANET) // Научный результат. Информационные технологии. 2016. № 1 (4). С. 64-71.

3. Децентрализованный протокол организации устойчивого взаимодействия в сетях с высокой динамикой изменения топологии / А. Н. Ивутин, А. С. Новиков, М. С. Пестин, А. Г. Волошко. DOI: <https://doi.org/10.15622/ia.23.3.4> // Информатика и автоматизация. 2024. № 3. С. 727-765.
4. Михайлов С. А. Обзор протокола маршрутизации DSR // Вестник науки и образования. 2017. № 8. 4 с. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-protokola-marshrutizatsii-dsr> (дата обращения: 15.11.2025). Доступна на сайте Cyberleninka.
5. Новиков А. С., Ивутин А. Н., Пестин М. С. Алгоритм маршрутизации для обеспечения быстрого восстановления связи при обрывах маршрутов в сетях MANET // Системы управления, связи и безопасности. 2024. № 2. С. 14-42.
6. Анализ эффективности применения протоколов маршрутизации в компьютерных сетях / Т. В. Аветисян, Я. Е. Львович, И. Я. Львович, Р. А. Блинов // International Journal of Advanced Studies. 2023. Т. 13, № 3. С. 95-114.
7. Hajlaoui R. O-DSR: Optimized DSR Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Network. International Journal of Wireless & Mobile Networks. 2015; doi:10.5121/IJWMN.2015.7403

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ SAAS ТЕХНОЛОГИЙ В ОБЛАСТИ ОБЛАЧНЫХ РЕШЕНИЙ

МАЛАХОВ Сергей Валерьевич, кандидат технических наук,
доцент, доцент кафедры информатики и робототехнических систем
*Поволжский государственный университет
телекоммуникаций и информатики
443010, Россия, Самара, s.malakhov@psuti.ru*

ЛОГИНОВ Денис Вячеславович, магистрант
*Поволжский государственный университет
телекоммуникаций и информатики
443010, Россия, Самара, denis.loginow@mail.ru*

Аннотация. В работе представлены результаты исследования технической и экономической эффективности перехода на SaaS-модель в бизнесе. Демонстрируется, как операционные расходы (OpEx) на подписку SaaS сравниваются с капитальными затратами (CapEx) на развертывание и поддержку локального ПО.

Ключевые слова: SaaS (Software-as-a-Service), модель обслуживания, облачные технологии, операционные расходы (OpEx), капитальные расходы (CapEx), масштабируемость, производительность, доступность, интеграция данных.

A STUDY OF THE EFFICIENCY OF SAAS TECHNOLOGIES IN THE FIELD OF CLOUD SOLUTIONS

MALAKHOV Sergey Valerievich, Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor, Associate Professor at the Department
of Computer Science and Robotic Systems
*Volga State University of Telecommunications and Informatics
443010, Russia, Samara, s.malakhov@psuti.ru*

LOGINOV Denis Vyacheslavovich, Master's student
*Volga State University of Telecommunications and Informatics
443010, Russia, Samara, denis.loginow@mail.ru*

Abstract. This paper presents the results of a study examining the technical and economic efficiency of transitioning to a SaaS model in business. It demonstrates

how the operating expenses (OpEx) of a SaaS subscription compare with the capital expenses (CapEx) of deploying and supporting on-premises software.

Keywords: SaaS (Software-as-a-Service), service model, cloud technologies, operating expenses (OpEx), capital expenses (CapEx), scalability, performance, availability, data integration.

ВВЕДЕНИЕ

Современный этап цифровой трансформации бизнеса характеризуется массовым переходом от традиционных моделей лицензирования программного обеспечения к облачным сервисам. Среди моделей облачных услуг именно Software-as-a-Service (SaaS) приобрела доминирующее положение, предлагая организациям доступ к готовым приложениям через интернет по подписной модели. Данная модель имеет значительные преимущества, такие как снижение капитальных затрат, высокая масштабируемость и оперативное внедрение новых функций [1].

Несмотря на очевидные преимущества – от снижения затрат до оперативной масштабируемости – на практике возникает вопрос о реальной, а не рекламной, эффективности этой модели. Данное исследование направлено на демонстрацию четких критериев оценки окупаемости и продуктивности внедрения SaaS.

В исследовании выделены четкие метрики эффективности. Они обусловлены сравнительным анализом эффективности SaaS-решений и их локальных аналогов. Практическая значимость работы заключается в предоставлении компаниям инструмента для обоснованного выбора облачных сервисов и минимизации рисков перехода на них. Анализ проведен по одним из важнейших критериев в области IT-индустрии.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В ходе исследования был проведен сравнительный эксперимент.

Была изучена техническая литература и проведен сравнительный анализ типичного корпоративного решения (например, CRM) в SaaS-версии (например,

Microsoft Dynamics 365) и его локальный аналог (развернутый на собственных серверах). Результаты исследования по выделенным критериям представлены в табл. 1.

Таблица 1

Сравнительный анализ SaaS-решения и локального аналога

Критерий	Локальное решение	SaaS-решение
Модель ответственности	Полная. Компания самостоятельно обеспечивает безопасность на всех уровнях.	Разделенная. Провайдер отвечает за безопасность платформы. Клиент отвечает за безопасность своих данных.
Капитальные затраты (CapEx)	Высокие. Единовременные инвестиции в серверное оборудование, сетевую инфраструктуру, лицензии ПО.	Нет или минимальны. Не требуется покупка основной инфраструктуры.
Операционные затраты (OpEx)	Постоянные. Электропитание, охлаждение, зарплата ИТ-персонала, ремонт и модификация оборудования.	Прогнозируемые. Регулярная подписка, включающая в себя: обновление функционала, ТП, уровень доступности.
Совокупная стоимость владения (ТСО)	Высокая. Сложно прогнозируемая из-за скрытых затрат (ремонт и улучшение оборудования).	Как правило, не выше локальных. Прозрачная и прогнозируемая модель расходов.
Масштабируемость	Технически сложная и дорогая.	Простая и быстрая.

ВЫВОДЫ

Проведенный сравнительный анализ главных критериев реализации SaaS-решений и их локальных аналогов позволяет сделать следующие выводы:

- Кардинальные различия в структуре затрат. Локальные решения имеют значительные капитальные затраты (CapEx), что создает высокий финансовый барьер для внедрения и требует крупных единовременных инвестиций. В противоположность этому, SaaS-модель имеет концепцию операционных расходов (OpEx), что обеспечивает более демократичный доступ к ПО.

- Предсказуемость бюджета. Регулярные фиксированные платежи позволяют точно планировать IT-расходы.
- Снижение TCO. За счет исключения затрат на обслуживание инфраструктуры.
- Экономия на масштабировании. Возможность гибко увеличивать или уменьшать мощности без дополнительных капиталовложений.
- Операционная эффективность. SaaS-решения демонстрируют превосходство в вопросах масштабируемости и оперативности развертывания.

Список источников

1. Холодова, Е. А. Облачные технологии и их применение в бизнес-проектах / Е. А. Холодова, А. Н. Рыжков // E-Scio. 2023. № 5(80). С. 152-157. – EDN MLJBYP.

**ДВУХГОЛОВАЯ НЕЙРОСЕТЕВАЯ МОДЕЛЬ
НА БАЗЕ EFFICIENTNET-V0 ДЛЯ КЛАССИФИКАЦИИ
ИНЖЕНЕРНЫХ ДОКУМЕНТОВ**

МАРДГАЛИМОВ Ильдар Раильевич, специалист
департамента разработки технологий анализа данных
ООО «Открытый код»
443001, Россия, Самара, silwercold@gmail.com

ФЕДУЛОВ Александр Михайлович, специалист
департамента разработки технологий анализа данных
ООО «Открытый код»
443001, Россия, Самара, sanofedulov2002@mail.ru

ГУСАРОВ Максим Евгеньевич, специалист
департамента разработки технологий анализа данных
ООО «Открытый код»
443001, Россия, Самара, ya.maxim-gusarov@yandex.ru

ДУСЕНБАЕВ Амиржан Эдуардович, специалист
департамента разработки технологий анализа данных
ООО «Открытый код»
443001, Россия, Самара, dusenbaev101@gmail.com

ЛВОВ Иван Вячеславович, специалист
департамента разработки технологий анализа данных
ООО «Открытый код»
443001, Россия, Самара, lvoff2002@mail.ru

Аннотация. Представлен двухголовый CNN-классификатор на базе EfficientNet-V0 для одновременного определения типа конструкторской документации и позиции листа. Совместное обучение с общим экстрактором признаков и двумя независимыми выходными головами. Модель компактна и быстра, легко встраивается в конвейер оцифровки, снижает количество лишних OCR-проходов и корректно маршрутизирует документы, сокращая трудозатраты операторов. Намечены направления развития.

Ключевые слова: Машинное обучение, классификация, конструкторская документация, машинное зрение.

DUAL-HEAD NEURAL NETWORK MODEL BASED ON EFFICIENTNET-B0 FOR ENGINEERING DOCUMENT CLASSIFICATION

MARDGALIMOV Ildar Railevich, Specialist
at the Department of Data Analysis Technology Development
Open Code
443001, Russia, Samara, silwercold@gmail.com

FEDULOV Alexander Mikhailovich, Specialist
at the Department of Data Analysis Technology Development
Open Code
443001, Russia, Samara, sanofedulov2002@mail.ru

GUSAROV Maxim Evgenevich, Specialist
at the Department of Data Analysis Technology Development
Open Code
443001, Russia, Samara, ya.maxim-gusarov@yandex.ru

DUSENBAEV Amirzhan Eduardovich, Specialist
at the Department of Data Analysis Technology Development
Open Code
443001, Russia, Samara, dusenbaev101@gmail.com

LVOV Ivan Vyacheslavovich, Specialist
at the Department of Data Analysis Technology Development
Open Code
443001, Russia, Samara, lvoff2002@mail.ru

Abstract. We present a dual-head CNN classifier built on EfficientNet-B0 that jointly determines the type of engineering documentation and the page position within a set. Joint training with a shared feature extractor and two independent output heads. The model is compact and fast, integrates readily into a digitization pipeline, reduces redundant OCR passes, and correctly routes documents, thereby lowering operator workload. Directions for future work are outlined.

Keywords: Machine Learning, Classification, Engineering Documentation, Computer Vision.

ВВЕДЕНИЕ

Автоматизация работы с инженерной конструкторской документацией (чертежами, спецификациями и пр.) является важным этапом цифровизации

производственных процессов. В крупных организациях с большим потоком разнородных документов актуальна задача автоматической классификации сканированных страниц. Для таких документов обычно требуется определить два аспекта: тип документа (например, сборочный чертеж, чертеж детали или текстовая спецификация) и позицию в серии (первый лист комплекта или последующий). Автоматическое выявление этих признаков позволяет направлять документы по разным маршрутам обработки в электронном архиве, например, отличать титульные листы от последующих страниц для их отдельной потоковой обработки (отдельно применять OCR-модуль и другие алгоритмы). В данной работе предлагается нейросетевая модель с двумя выходными «головами» на общем сверточном ядре (рис. 1).

РЕЗУЛЬТАТЫ

В основе лежит предобученная модель архитектуры EfficientNet-B0, усеянная до глобального pooling и используемая как универсальный визуальный экстрактор признаков для документных изображений [1]. Над общим «торсом» размещены две независимые головные части (две «classification heads») с полностью связанными слоями:

- голова «тип документа» (3 выхода: сборочный, деталь, спецификация),
- голова «позиция в серии» (2 выхода: первый, последующий).

Такое многозадачное формулирование позволяет одной модели выучивать признаки, одновременно полезные для обеих задач, что повышает устойчивость на разнообразных макетах и качествах сканов [2].

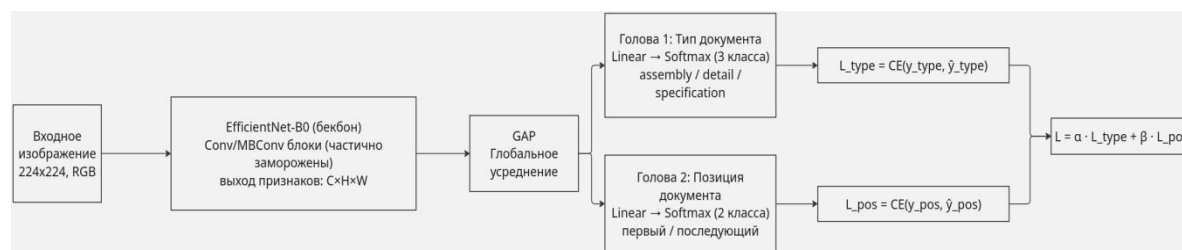


Рис. 1. Схема двухголового классификатора на основе EfficientNet-B0

Для обучения модели использован корпус из 954 сканов конструкторской документации трех типов, разбиение ~80 %/20 % на обучение и тест.

Для приближения к реальным условиям применялись легкие аугментации (некрупные повороты, флуктуации яркости), а исходные изображения приводились к входному размеру модели 224×224 с сохранением пропорций. Для борьбы с дисбалансом редких «последующих» листов в обучении использованы веса классов и сглаживание меток (label smoothing) [3]. Обучение велось в PyTorch с оптимизатором Adam и планировщиком OneCycleLR [4]; размораживались хвостовые блоки EfficientNet-B0 для целенаправленного дообучения высокоуровневых фильтров под документные паттерны. Батч-размер и длительность цикла подбирались так, чтобы модель быстро сходилась без переобучения (около 20 эпох).

Оценка велась отдельно по двум задачам на отложенной тестовой части.

- Тип документа (3 класса): точность около 0,98, подавляющее большинство страниц правильно отнесены к «сборочному», «детали» или «спецификации». Баланс по классам подтверждается высоким макро-показателем, сопоставимым с общей точностью.

- Позиция в серии (2 класса): макро-F1 порядка 0,73; при этом редкий класс «последующий лист» имеет F1 около 0,55, что существенно повышает надежность маршрутизации последующих страниц и снижает ручные правки.

На валидации и тесте кривые ошибок и точности сходятся без признаков переобучения, что подтверждает устойчивость решения (рис. 2).

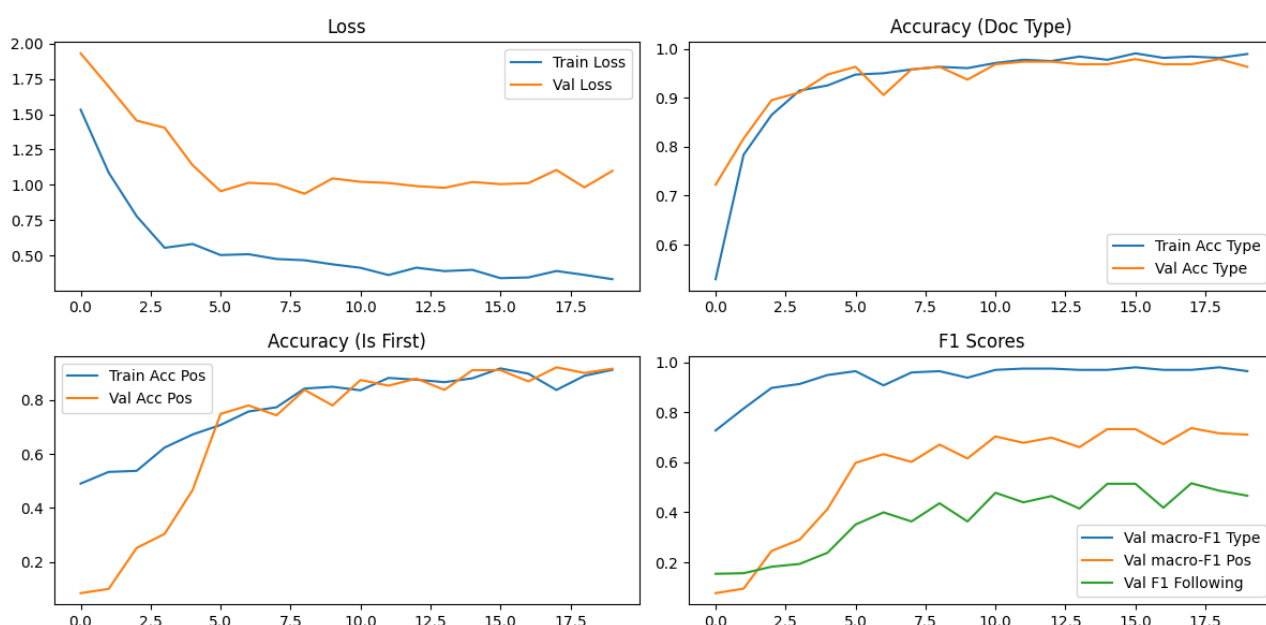


Рис. 2. Кривые обучения модели

ВЫВОДЫ

Предсказание двух признаков в одном проходе существенно упрощает последующую обработку. Встраивание в систему электронного архива снимает нагрузку на оператора, повышает скорость документооборота и снижает цену ошибки при разборе комплектов, в том числе за счет сокращения лишних OCR-проходов в конвейере распознавания [5]. Показатели качества соответствуют промышленным ожиданиям: точность $\sim 98\%$ по типам и надёжный, пусть и более сложный, бинарный сигнал «первый/последующий» с $\text{macro-F1} \approx 0,73$ обеспечивают достаточную автоматизацию при сохранении возможности бизнес-правил для «угловых» случаев.

Отдельно важно, что предложенное решение остается компактным и быстрым. EfficientNet-B0 выбран как удачный компромисс производительности и качества, а две головы увеличивают лишь завершающую часть графа вычислений. Это облегчает развертывание на сервере с ограниченным GPU-бюджетом и открывает возможность горизонтального масштабирования без экспоненциального роста стоимости. При необходимости модель можно донастроить под локальные стандарты оформления (вариации штампов и рамок) или дополнить вниманием к областям интереса, прежде всего к основной надписи и полям «Лист/Листов», которые часто выступают носителями слабоформальных, но информативных паттернов.

Направления дальнейшего развития включают расширение корпуса обучающих данных за счет синтетического увеличения доли «последующих» листов, исследование механизмов внимания для локализации титульных областей, а также использование последовательного контекста комплекта. При этом уже достигнутые метрики демонстрируют готовность модуля к пилотной интеграции в производственные процессы: экономия времени операторов, снижение ручной валидации и прогнозируемая скорость обработки подтверждают практическую значимость двухголового классификатора инженерной документации.

Список источников

1. Tan M., Le Q. EfficientNet : Rethinking Model Scaling for Convolutional Neural Networks. DOI:10.48550/arXiv.1905.11946 // Proceedings of the 36th International Conference on Machine Learning (ICML 2019). PMLR, 2019. P. 6105–6114.
2. Zhang Y., Yang Q. An overview of multi-task learning. DOI:10.1093/nsr/nwx105 // National Science Review. 2018. vol. 5, № 1. P. 30-43.
3. Müller R., Kornblith S., Hinton G. When Does Label Smoothing Help? // Advances in Neural Information Processing Systems. 2019. URL: <https://papers.nips.cc/paper/8717-when-does-label-smoothing-help>. (дата обращения: 11.11.2025).
4. Smith L. N. A Disciplined Approach to Neural Network Hyper-Parameters : Part 1 Learning Rate, Batch Size, Momentum, and Weight Decay. 2018. URL: <https://arxiv.org/abs/1803.09820> (дата обращения: 10.11.2025). DOI:10.48550/arXiv.1803.09820.
5. TrOCR : Transformer-based Optical Character Recognition with Pre-trained Models / M. Li et al. DOI: <https://doi.org/10.1609/aaai.v37i11.26538> // Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence. Vol. 37 No. 11: AAAI-23 Technical Tracks 11. 2023. URL: <https://ojs.aaai.org/index.php/AAAI/article/view/26538> (дата обращения: 11.11.2025).
6. DocLayNet : A Large Human-Annotated Dataset for Document-Layout Segmentation / B. Pfizmann et al. DOI:10.1145/3534678.3539043. URL: <https://arxiv.org/abs/2206.01062> (дата обращения: 10.11.2025).
7. Harley A. W., Ufkes A., Derpanis K. G. Evaluation of Deep Convolutional Nets for Document Image Classification and Retrieval. DOI: 10.1109/ICDAR.2015.7333910 // 13th Int. Conf. on Document Analysis and Recognition (ICDAR). IEEE, 2015. P. 991-995. URL: <https://adamharley.com/rvl-cdip/> (дата обращения: 11.11.2025).

ОСОБЕННОСТИ ПОВЫШЕНИЯ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ RFID-СИГНАЛОВ

МЯСНИКОВ Данил Львович, аспирант
*Поволжский государственный университет
телекоммуникаций и информатики
443010, Россия, Самара, myasnikov.danil@internet.ru*

НЕЩЕРЕТ Анатолий Михайлович, доктор
физико-математических наук
*Поволжский государственный университет
телекоммуникаций и информатики
443010, Россия, Самара
АО «Самарское инновационное предприятие радиосистем»
443052, Россия, Самара, neshchereta@gmail.com*

Аннотация. Работа посвящена исследованию особенностей повышения помехоустойчивости сигналов радиочастотной идентификации (RFID). Рассматривается проблема снижения точности считывания данных вследствие негативного влияния внешних факторов (помехи, наводки, отраженные волны). Предлагаются меры по восстановлению подверженного помехам сигнала обеспечение стабильной работы RFID-систем даже в сложных условиях эксплуатации.

Ключевые слова: радиочастотная идентификация (RFID), помехоустойчивость, радиочастотный сигнал, шумовая среда, надежность системы.

FEATURES OF INCREASING THE NOISE IMMUNITY OF RFID SIGNALS

MYASNIKOV Danil Lvovich, PhD student
*Volga Region State University of Telecommunications and Informatics
443010, Russia, Samara myasnikov.danil@internet.ru*

NESHERET Anatoly Mikhailovich, Doctor
of Physical and Mathematical Sciences
*Volga Region State University of Telecommunications and Informatics
443010, Russia, Samara
Samara Innovative Enterprise of Radio Systems
443052, Russia, Samara, neshchereta@gmail.com*

Abstract. The work is devoted to the study of the features of increasing the noise immunity of radio frequency identification (RFID) signals. The problem of reducing the accuracy of data reading due to the negative influence of external factors (interference, interference, reflected waves) is considered. Measures are proposed to restore the signal affected by interference, ensuring stable operation of RFID systems even in difficult operating conditions.

Keywords: Radio frequency identification (RFID), noise immunity, radio frequency signal, noise environment, system reliability.

ВВЕДЕНИЕ

RFID-технологии широко применяются в логистике, промышленности, торговле и других сферах благодаря своей способности автоматически идентифицировать большой объем объектов бесконтактным способом. Однако для достижения такого эффекта необходимо бороться с внешними факторами, создающими помехи и снижающими точность идентификации. Таким образом, важнейшим вопросом исследования является выявление возможностей минимизации влияния помех, разработка методик и технологий, позволяющих повысить устойчивость и стабильность работы RFID-систем.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В ходе исследования были проанализированы воздействия помех на RFID-сигналы, распространяемые в направлении от метки к считывателю. Перспективной альтернативой классическим методам определен наиболее эффективный метод восстановления зашумленного сигнала с помощью сверточной нейронной сети. Среди основных результатов:

1. Создание принципа обработки сигнала. Предлагается обрабатывать битовую последовательность, относящуюся к идентификатору метки TID, состоящую из 64 битов и дающую однозначное представление о метке и, соответственно, ее носителе.

2. Разработка наиболее эффективной структуры сверточной нейронной сети для обработки частотно-временной формы сигнала. Исходный сигнал,

подверженный значительному уровню помехи, рассматривается с точки зрения 2D изображения. Для данного процесса был создан обучающий набор данных, состоящий из более чем 9000 изображений с различным уровнем помехи. Сформированный датасет пригоден для трансферного обучения и дальнейшего обучения нейронных сетей.

3. Проведено рассмотрение технических возможностей созданной сети при ее интеграции в существующие RFID-системы и экономических аспектов от него, а также подробный процесс внедрения предложенного метода в действующую систему сигналов радиочастотной идентификации с учетом всех специфических нюансов этой области.

ВЫВОДЫ

В проведенных исследованиях получены положительные результаты, комбинирование которых в комплексе формирует конкурентный и превосходящий по качеству метод повышения помехоустойчивости RFID-сигналов, что позволяет значительно увеличить стабильность и надежность работы систем радиочастотной идентификации (рис. 1). Быстродействие метода не вносит существенных задержек в работу системы. При рассмотрении экономической составляющей при внедрении метода получены положительные результаты, свидетельствующие о высокой его эффективности и возможности уменьшения издержек и финансовых затрат. Применение данного метода способствуют успешному внедрению RFID-технологий в разнообразные области логистики и производства и всестороннему повышению их эффективности.

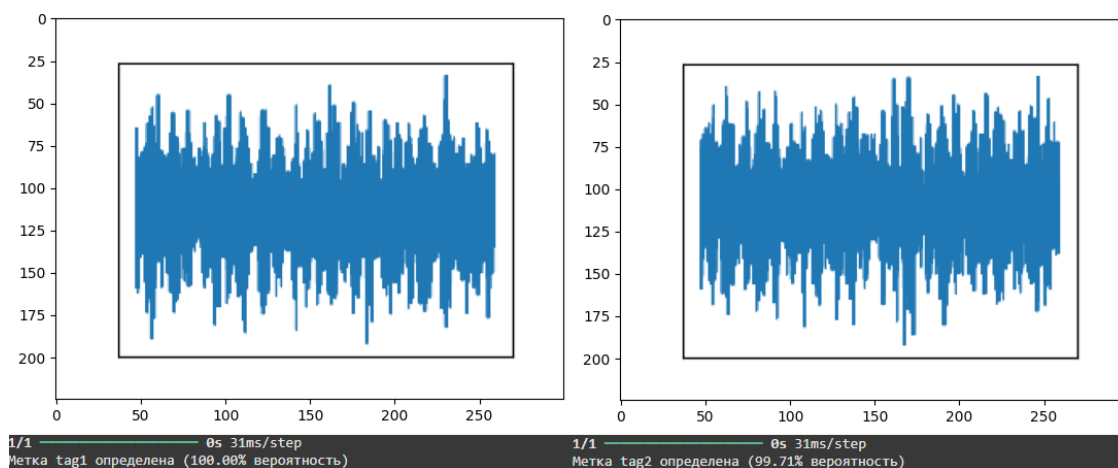


Рис. 1. Результат работы сети по классификации зашумленного сигнала радиочастотной идентификации

Список источников

1. ГОСТ Р ИСО/МЭК 18000-62-2014. Информационные технологии. Идентификация радиочастотная для управления предметами. Часть 62. Параметры радиointерфейса для связи в диапазоне частот 860-960 МГц, тип В : национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 13 марта 2014 г. № 132-ст. : введен впервые. Москва : Стандартиформ, 2015. 62 с.
2. ГОСТ Р ИСО/МЭК 18000-6-2013. Информационные технологии. Идентификация радиочастотная для управления предметами. Часть 6. Параметры радиointерфейса для связи в диапазоне частот 860-960 МГц. Общие требования : национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 15 мая 2013 г. № 105-ст. : введен впервые. Москва : Стандартиформ, 2014. 14 с.
3. Ключев Д. С., Мясников Д. Л. Создание нейронной сети для классификации зашумленных сигналов радиочастотной идентификации // Радиолокация, навигация, связь : сб. тр. XXXI Междунар. научн.-техн. конф. Т. 5. Воронеж, 2025. С. 292–297.
4. Interference analysis of uhf rfid systems / D.-Y. Kim et al. DOI:10.2528/PIERB08010607 // Progress In Electromagnetics Research. 2008. В, Vol. 4. P. 115–126.
5. Коваленко К. Ю., Муртазина Л. Ш. Обзор способов использования нейронных сетей для развития помехоустойчивой передачи сигнала // Научный аспект. Информ. технологии. 2024. № 5. С. 131–132. URL: <https://na-journal.ru/5-2024-informacionnye-tehnologii/12199-obzor-sposobov-ispolzovaniya-neironnyh-setei-dlya-razvitiya-pomehoustoichivoi-peredachi-signala> (дата обращения: 10.03.2025).
6. Ключев Д. С., Мясников Д. Л. Метод компьютерного моделирования RFID сигналов УВЧ диапазона по обратной линии связи «радиочастотная

метка – устройство опроса» // Радиолокация, навигация, связь : сб. тр. XXXI Междунар. научн.-техн. конф. Т. 5. Воронеж, 2025. С. 282–287.

7. Ключев Д. С., Мясников Д. Л. Создание датасета зашумленных RFID сигналов для обучения нейронной сети // Радиолокация, навигация, связь : сб. тр. XXXI Междунар. научн.-техн. конф. Т. 5. Воронеж, 2025. С. 288–291.

8. Помехи для RFID: основные проблемы // viaondarfid : сайт. URL: <https://www.viaondarfid.com.br/ru/%D0%BF%D0%BE%D0%BC%D0%B5%D1%85%D0%B8-%D0%B4%D0%BB%D1%8F-RFID> (дата обращения: 20.03.2025).

9. Смецкой И. А., Карауш А. С. Исследование помехоустойчивости RFID оборудования относительно реальных ситуаций : Проект ГПО РЗИ-1204 – Исследование систем радиочастотной идентификации объектов в библиотеках. URL: https://storage.tusur.ru/files/8578/РЗИ1204_Исследование%20помехоустойчивости%20RFID%20оборудования%20относительно%20реальных%20ситуаций.pdf (дата обращения: 22.03.2025).

**ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ КОДИРОВАНИЯ
ВИДЕОПОТОКОВ НА ТОЧНОСТЬ ДЕТЕКЦИИ
КЛЮЧЕВЫХ ТОЧЕК В ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ
СИСТЕМАХ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ**

НЕФЁДОВА Дарья Сергеевна, студентка
кафедры телекоммуникационных систем
Уфимский университет науки и технологий
450008, Россия, Уфа, ufavoblako@yandex.ru

ОЛЬКОВА Наталья Сергеевна, студентка
кафедры телекоммуникационных систем
Уфимский университет науки и технологий
450008, Россия, Уфа, olknata@gmail.com

Аннотация: Исследуется влияние параметров кодирования видеопотоков (разрешение 480p/720p, кадровая частота 25/30 fps, битрейт 500–2000 кбит/с) на точность детекции 17 ключевых точек тела человека алгоритмом MediaPipe Pose в телекоммуникационных системах реального времени. Экспериментально установлены количественные зависимости метрик Object Keypoint Similarity (OKS), точности классификации и задержки обработки от параметров сжатия H.264 на датасете WLU Rehabilitation Posture. Впервые рассчитаны новые метрики эффективности: Bandwidth Efficiency, Quality of Service Index, Relative Accuracy Degradation и Performance Index для различных конфигураций кодирования. Результаты обосновывают рекомендации по адаптивному выбору конфигураций для систем удаленной медицины и фитнес-приложений с учетом компромисса качество – скорость.

Ключевые слова: детекция ключевых точек, кодирование видеопотоков, MediaPipe Pose, телекоммуникационные системы, OKS; битрейт, разрешение, качество обслуживания, системы реального времени, bandwidth efficiency.

**THE INFLUENCE OF VIDEO STREAM ENCODING
PARAMETERS ON THE ACCURACY OF KEYPOINT DETECTION
IN REAL-TIME TELECOMMUNICATION SYSTEMS**

NEFEDOVA Darya Sergeevna, student
of the Department of Telecommunication Systems

*Ufa University of Science and Technology
450008, Russia, Ufa, ufavoblako@yandex.ru*

OLKOVA Natalia Sergeevna, student
of the Department of Telecommunication Systems
*Ufa University of Science and Technology
450008, Russia, Ufa, olknata@gmail.com*

Abstract: The study investigates the influence of video stream encoding parameters (resolution 480p/720p, frame rate 25/30 fps, bitrate 500–2000 kbps) on the accuracy of detecting 17 human body keypoints using the MediaPipe Pose algorithm in real-time telecommunication systems. Quantitative dependencies of the Object Keypoint Similarity (OKS) metrics, classification accuracy, and processing delay on H.264 compression parameters were experimentally established using the WLU Rehabilitation Posture dataset. For the first time, new performance metrics were calculated: Bandwidth Efficiency, Quality of Service Index, Relative Accuracy Degradation, and Performance Index for various encoding configurations. The results substantiate recommendations for the adaptive selection of configurations for telemedicine systems and fitness applications, taking into account the quality-speed trade-off.

Keywords: keypoint detection, video stream encoding, MediaPipe Pose, telecommunication systems, OKS, bitrate, resolution, quality of service, real-time systems, bandwidth efficiency.

ВВЕДЕНИЕ

Современные телекоммуникационные системы реального времени – видеоконференции, удаленная медицина, системы дистанционной реабилитации – активно интегрируют алгоритмы компьютерного зрения для бесконтактного анализа поведения человека [1]. Детекция ключевых точек тела является фундаментальной технологией, позволяющей оценивать позу, жесты и движения без применения физических датчиков. Однако передача видеопотоков в условиях ограниченной пропускной способности канала требует компрессии, которая вызывает деградацию качества изображения и снижает точность алгоритмов детекции [2].

Проблема компромисса между степенью сжатия видео и точностью распознавания является критической для практического применения. Современные

модели детекции поз (MediaPipe/BlazePose, MoveNet, YOLOv8-pose) демонстрируют высокую чувствительность к артефактам блочного кодирования при сжатии кодеками H.264/H.265 [3, 4]. Актуальность исследования обусловлена необходимостью количественной оценки влияния параметров кодирования на точность детекции для научно обоснованного выбора конфигураций в ресурсо-ограниченных приложениях.

Цель работы – экспериментально установить количественные зависимости точности детекции ключевых точек от параметров кодирования видеопотоков (битрейт, разрешение, кадровая частота) и разработать новые метрики эффективности для адаптивного выбора конфигураций в телекоммуникационных системах реального времени.

Методика исследования и метрики качества

Экспериментальная база

В качестве экспериментального материала использовался датасет WLU Rehabilitation Posture Dataset [5], содержащий видеозаписи реабилитационных упражнений. Отобрано 20 видеофайлов упражнений Arm Raise и Sit-to-Stand, исходное разрешение 640×480 пикселей, средняя длительность 5 секунд.

Видео перекодировались кодеком H.264 в две серии конфигураций:

- **Эксперимент 1** (влияние битрейта): 2000, 1000, 500 кбит/с при фиксированном разрешении 640×480.
- **Эксперимент 2** (влияние разрешения и fps): комбинации 480p/720p и 25/30 fps.

Детекция ключевых точек выполнялась моделью MediaPipe Pose[6] на CPU, извлекались координаты 17 анатомических маркеров стандарта COCO.

Метрики качества

Object Keypoint Similarity (OKS) – стандартная метрика точности локализации ключевых точек:

$$\text{OKS} = \frac{\sum_{i=1}^N \exp\left(-\frac{d_i^2}{2s^2k_i^2}\right) v_i}{\sum_{i=1}^N v_i},$$

где d_i – евклидово расстояние между предсказанной и эталонной позицией i -й точки, s – масштаб объекта, k_i – константа типа точки, v_i – индикатор видимости.

Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR) — метрика качества сжатия видео:

$$\text{PSNR} = 10 \log_{10} \frac{\text{MAX}^2}{\text{MSE}},$$

где MSE – среднеквадратичная ошибка между исходным и сжатым кадром.

Новые метрики эффективности:

1. **Bandwidth Efficiency (BE)** – эффективность использования пропускной способности:

$$\text{BE} = \frac{\text{OKS}}{\text{Битрейт (Мбит/с)}}.$$

2. **Quality of Service Index (QoSI)** – комплексная метрика качества:

$$\text{QoSI} = w_1 \cdot \text{OKS} + w_2 \cdot \left(1 - \frac{t_{\text{inf}}}{t_{\text{max}}}\right) + w_3 \cdot \frac{\text{PSNR}}{\text{PSNR}_{\text{max}}},$$

где веса для real-time: $w_1 = 0,4$, $w_2 = 0,4$, $w_3 = 0,2$; для offline: $w_1 = 0,5$, $w_2 = 0,1$, $w_3 = 0,4$.

3. **Relative Accuracy Degradation (RAD)** – относительное снижение точности:

$$\text{RAD} = \left(1 - \frac{\text{OKS}_{\text{compressed}}}{\text{OKS}_{\text{reference}}}\right) \times 100\%.$$

4. **Performance Index (PI)** – частота обработки:

$$\text{PI} = \frac{1000}{t_{\text{inf}} (\text{мс})}.$$

Результаты экспериментов

Влияние битрейта на точность детекции

Результаты эксперимента 1 на упражнении Arm Raise представлены в табл. 1.

Таблица 1

Зависимость метрик от битрейта для упражнения Arm Raise

Битрейт (кбит/с)	Средняя OKS	Accuracy	t_{inf} (мс)
2000	0,852	0,783	24,3
1000	0,812	0,475	24,1
500	0,763	0,698	23,9

Снижение битрейта с 2000 до 500 кбит/с приводит к падению OKS на 10,4 % (с 0,852 до 0,763). Корреляция Пирсона между битрейтом и OKS составляет $r \approx -0,95$ ($p < 0,05$), что подтверждает статистически значимое влияние степени сжатия на точность локализации. Задержка обработки остается стабильной (23,9–24,3 мс), что соответствует частоте обработки ~41 FPS и удовлетворяет требованиям систем реального времени ($t_{\text{inf}} < 50$ мс).

Влияние разрешения и кадровой частоты

Результаты эксперимента 2 на упражнении Sit-to-Stand приведены в табл. 2.

Таблица 2

Зависимость метрик от конфигурации для упражнения Sit-to-Stand

Конфигурация	PSNR (дБ)	OKS	Confidence	t_{inf} (мс)
480p@25fps	35,2 ± 1,8	0,782 ± 0,045	0,845 ± 0,032	18,3 ± 2,1
480p@30fps	35,1 ± 1,7	0,785 ± 0,043	0,848 ± 0,031	18,1 ± 2,0
720p@25fps	38,6 ± 1,5	0,852 ± 0,038	0,891 ± 0,028	32,7 ± 3,2
720p@30fps	38,5 ± 1,6	0,854 ± 0,037	0,893 ± 0,027	32,4 ± 3,1

Увеличение разрешения с 480p до 720p повышает среднюю OKS на 8,8% (с 0,784 до 0,853) при росте задержки на 79% (с 18,2 мс до 32,6 мс). Корреляция между разрешением и OKS: $r \approx 0,92$ ($p < 0,01$). Повышение fps с 25 до 30 незначительно влияет на OKS (вариация <2%), что объясняется квазистатичным характером поз.

Анализ новых метрик эффективности

Рассчитанные значения новых метрик представлены в табл. 3 и 4.

Таблица 3

Новые метрики для эксперимента 1

Битрейт (кбит/с)	BE	RAD (%)	TPO (кбит/с/OKS)	PI (FPS)
2000	0,426	0,00	2347,4	41,15
1000	0,812	4,69	1231,5	41,49
500	1,526	10,45	655,3	41,84

Новые метрики для эксперимента 2

Конфигурация	BE	QoSI _{realtime}	QoSI _{offline}	PI (FPS)
480p@25fps	0,782	0,749	0,819	54,64
480p@30fps	0,785	0,751	0,820	55,25
720p@25fps	0,426	0,679	0,861	30,58
720p@30fps	0,427	0,682	0,861	30,86

Bandwidth Efficiency (BE): Максимальная эффективность достигается при битрейте 500 кбит/с ($BE = 1,526$), однако это сопровождается деградацией точности на 10,45 %. Для конфигураций 480p BE в 1,8 раза выше, чем для 720p (0,784 против 0,427), что указывает на более рациональное использование пропускной способности при умеренном разрешении.

Quality of Service Index (QoSI): Для систем реального времени оптимальной является конфигурация 480p@30fps ($QoSI = 0,751$), обеспечивающая баланс между точностью и низкой задержкой. Для offline-анализа предпочтительна 720p@30fps ($QoSI = 0,861$) с максимальной точностью при допустимой задержке.

Relative Accuracy Degradation (RAD): Снижение битрейта до 1000 кбит/с приводит к деградации точности на 4,69 %, до 500 кбит/с – на 10,45 %. Пороговое значение $RAD = 5 \%$ может служить критерием приемлемого качества для большинства приложений.

Performance Index (PI): Конфигурации 480p демонстрируют $PI > 54 \text{ FPS}$, что значительно превышает требования реального времени, тогда как 720p обеспечивают $PI \approx 31 \text{ FPS}$ при сохранении приемлемых характеристик.

Графическая визуализация зависимостей представлена на рис. 1–4.

На рис. 1 показана монотонная зависимость OKS от битрейта. Рис. 2 демонстрирует превосходство конфигураций 480p по эффективности использования канала. Рис. 3 отображает компромисс точность – задержка: область оптимальных конфигураций соответствует высокой OKS при низкой задержке. Рис. 4 показывает, что индекс QoSI существенно зависит от сценария использования.

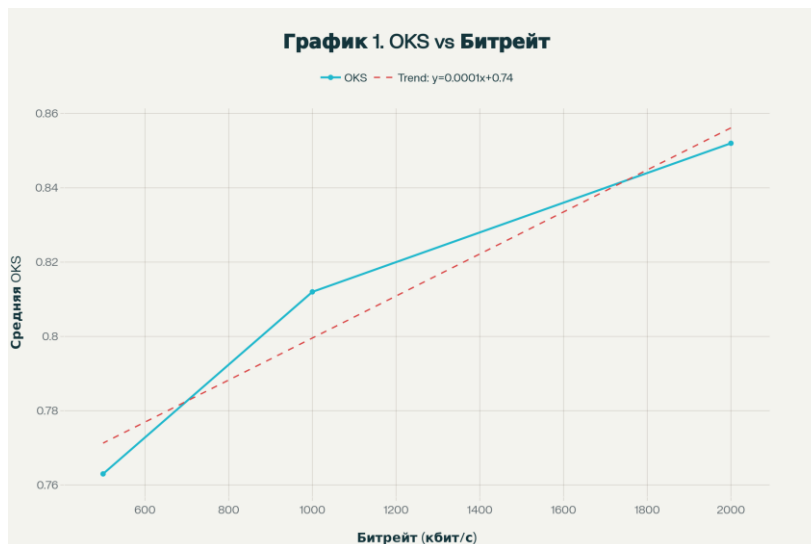


Рис. 1. Зависимость OKS от битрейта (Эксперимент 1)

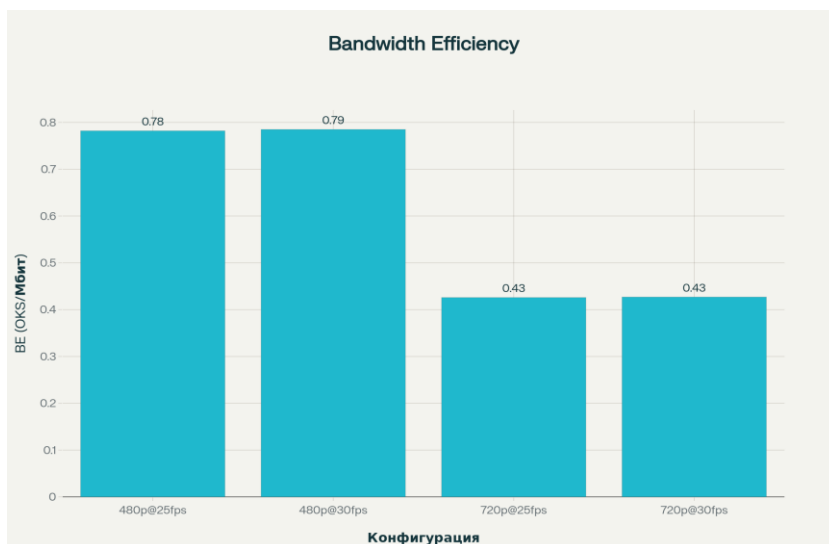


Рис. 2. Bandwidth Efficiency для различных конфигураций (Эксперимент 2)

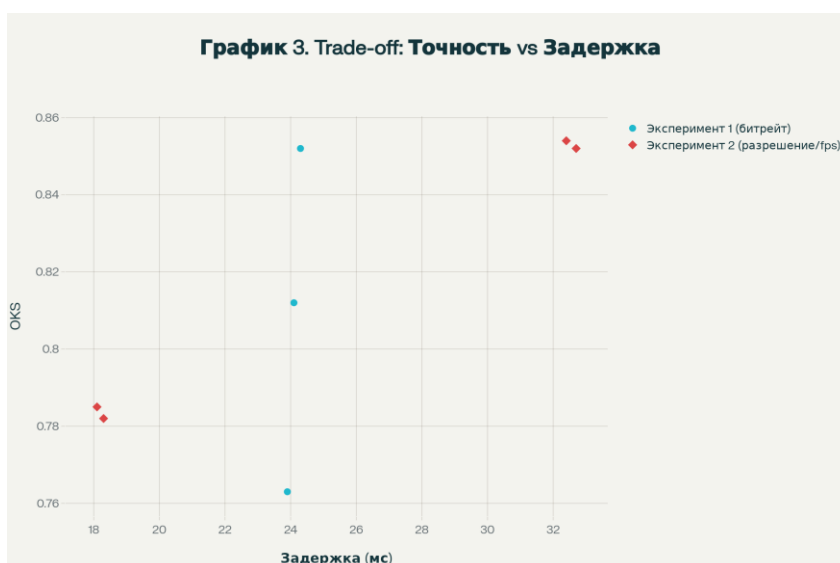


Рис. 3. Trade-off диаграмма: точность vs задержка обработки

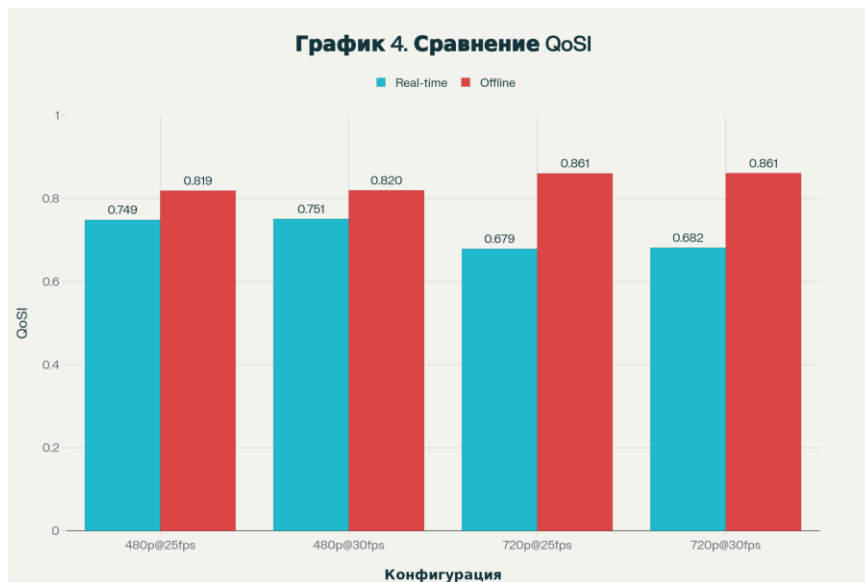


Рис. 4. Сравнение *QoSI* для сценариев *real-time* и *offline*

Анализ результатов и выводы

Экспериментально установлено, что битрейт и разрешение являются критическими параметрами для точности детекции ключевых точек, тогда как влияние кадровой частоты для квазистатичных поз незначимо. Впервые рассчитанные метрики Bandwidth Efficiency, Quality of Service Index, Relative Accuracy Degradation и Performance Index обеспечивают комплексную оценку конфигураций кодирования с учетом компромисса качество – эффективность – производительность.

Анализ практических рекомендаций:

- Для систем реального времени (видеоконференции, дистанционная реабилитация): **480p@30fps с битрейтом ≥ 1000 кбит/с** (OKS = 0,785, t_{inf} = 18,1 мс, BE = 0,785, QoSI = 0,751).
- Для offline-анализа (медицинская диагностика, научные исследования): **720p@25fps с битрейтом ≥ 2000 кбит/с** (OKS = 0,852, QoSI = 0,861).
- При ограниченной пропускной способности <1000 кбит/с учитывать деградацию RAD > 5% и повышать порог Confidence до 0,6–0,7.
- Использовать метрику BE для адаптивного выбора конфигураций при изменении состояния канала.

Результаты могут использоваться для проектирования адаптивных систем видеоаналитики с динамической настройкой параметров кодирования

в зависимости от доступной пропускной способности и требований QoS/QoE конкретного приложения.

Ограничения исследования: результаты получены для модели MediaPipe Pose и датасета WLU Rehabilitation Posture Dataset с квазистатическими упражнениями; требуется валидация на других моделях детекции, датасетах и кодеках нового поколения (H.265/HEVC, AV1); эксперименты проведены без моделирования сетевых деградаций (потери пакетов, джиттер).

Список источников

1. Real-time human pose estimation and tracking on monocular videos : A systematic literature review / Y. Chen et al. // Neurocomputing. 2025. Vol. 655. P. 131309. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925231225019812?via%3Dihub> (дата обращения: 09.11.2025).

2. Comparing Human Pose Estimation through deep learning approaches : An overview / G. Dibenedetto et al. DOI:10.1016/j.cviu.2025.104297 // Computer Vision and Image Understanding. 2025. Vol. 252. P. 104–297.

3. Enhanced Pose Estimation for Badminton Players via Improved YOLOv8-Pose with Efficient Local Attention / Y. Wu et al. DOI: 10.3390/s25144446 // Sensors. 2025. Vol. 25, № 14. P. 44–46.

4. On the Impact of Lossy Image and Video Compression on the Performance of Deep Convolutional Neural Network Architectures / M. Poyser, A. Atapour-Abarghouei, T.P. Breckon. DOI:10.48550/arXiv.2007.14314 // 25th International Conference on Pattern Recognition (ICPR). 2021. P. 2830–2837.

5. WLU Rehabilitation Posture // Kaggle : site URL: <https://www.kaggle.com/datasets/sulaimanmuhammed/wlu-rehabilitation-posture> (дата обращения: 09.11.2025).

6. BlazePose: On-device Real-time Body Pose tracking / V. Bazarevsky et al. // 2020. ArXiv (Cornell University). URL: https://www.academia.edu/115087753/BlazePose_On_device_Real_time_Body_Pose_tracking (дата обращения: 09.11.2025).

7. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity / Z. Wang et al. DOI: 10.1109/TIP.2003.819861 // IEEE transactions on image processing. 2004. Vol. 13, № 4. P. 600–612.
8. Fan Z., Liu J., Wang Y. Motion adaptive pose estimation from compressed videos. DOI:10.1109/ICCV48922.2021.01151 // IEEE/CVF international conference on computer vision. 2021. P. 11719–11728.
9. Fast human pose estimation in compressed videos / H. Liu et al. DOI: 10.1109/TMM.2022.3141888 // IEEE Transactions on Multimedia. 2022. Vol. 25. P. 1390–1400.
10. Image Quality Assessment through FSIM, SSIM, MSE and PSNR. A Comparative Study / U. Sara, M. Akter, M.S. Uddin // Journal of Computer and Communications. 2019. Vol. 07, № 03. P. 8–18.

**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОНДЕНСАТОРОВ
ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЙ В ЭНЕРГОНЕЗАВИСИМОЙ ПАМЯТИ**

НОВИКОВ Павел Эдуардович, аспирант
*Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
220013, Республика Беларусь, Минск, p.novikov@bsuir.by*

КОРСАК Кирилл Витальевич, аспирант
*Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
220013, Республика Беларусь, Минск, k.korsak@bsuir.by*

ЛОВШЕНКО Иван Юрьевич, старший преподаватель
кафедры микро- и наноэлектроники
*Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
220013, Республика Беларусь, Минск, lovshenko@bsuir.by*

Аннотация. В работе представлены результаты компьютерного моделирования пяти различных конструкций сегнетоэлектрических конденсаторов на основе HfO_2 и HZO с использованием модели Ландау - Халатникова в программном комплексе Silvaco. Проведен сравнительный анализ электрических характеристик, включая зависимости поляризации и емкости от напряжения. Установлено, конструкция с никелевыми электродами на кремниевой подложке обладает сегнетоэлектрическими свойствами, что открывает возможность их применения для калибровочных измерений благодаря технологической простоте изготовления.

Ключевые слова: сегнетоэлектрические конденсаторы, HfO_2 , HZO , FeRAM, отрицательная емкость, компьютерное моделирование, Silvaco.

**COMPUTER MODELING OF FERROELECTRIC CAPACITORS
FOR APPLICATIONS IN NON-VOLATILE MEMORY**

NOVIKOV Pavel Eduardovich, PhD student
*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
220013, Republic of Belarus, Minsk, p.novikov@bsuir.by*

KORSAK Kirill Vitalievich, PhD student
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
220013, Republic of Belarus, Minsk, k.korsak@bsuir.by

LOVSHENKO Ivan Yuryevich, Senior Lecturer
at Department of Micro- and Nanoelectronics
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
220013, Republic of Belarus, Minsk, lovshenko@bsuir.by

Abstract. This paper presents the results of computer modeling of five different configurations of ferroelectric capacitors based on HfO_2 and HZO using the Landau-Khalatnikov model in the Silvaco software. A comparative analysis of electrical characteristics was carried out, including the dependencies of polarization and capacitance on voltage. It was established that the structure with nickel electrodes on a silicon substrate possesses ferroelectric properties, which opens up the possibility of their application for calibration measurements due to the technological simplicity of manufacturing.

Keywords: ferroelectric capacitors, HfO_2 , HZO, FeRAM, negative capacitance, computer modeling, Silvaco.

ВВЕДЕНИЕ

Современные энергонезависимые запоминающие устройства требуют создания эффективных ячеек памяти на основе сегнетоэлектриков. Наибольшими преимуществами обладают конденсаторные структуры типа 1Т1С благодаря лучшей масштабируемости и эксплуатационным характеристикам [1]. Структуры на основе HfO_2 и HZO демонстрируют сегнетоэлектрические свойства и совместимы с кремниевыми технологиями, что делает их перспективными для практического применения в микроэлектронике [2].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для моделирования использовался программный комплекс Silvaco с применением модели Ландау-Халатникова, связывающей поляризацию и падение напряжения в области диэлектрика. Было рассмотрено пять различных

конструкций конденсаторных структур (рис. 1): типовые MFM- и MFIM-структуры с электродами из W и TiN, а также тестовые структуры с никелевыми электродами на кремниевой подложке.

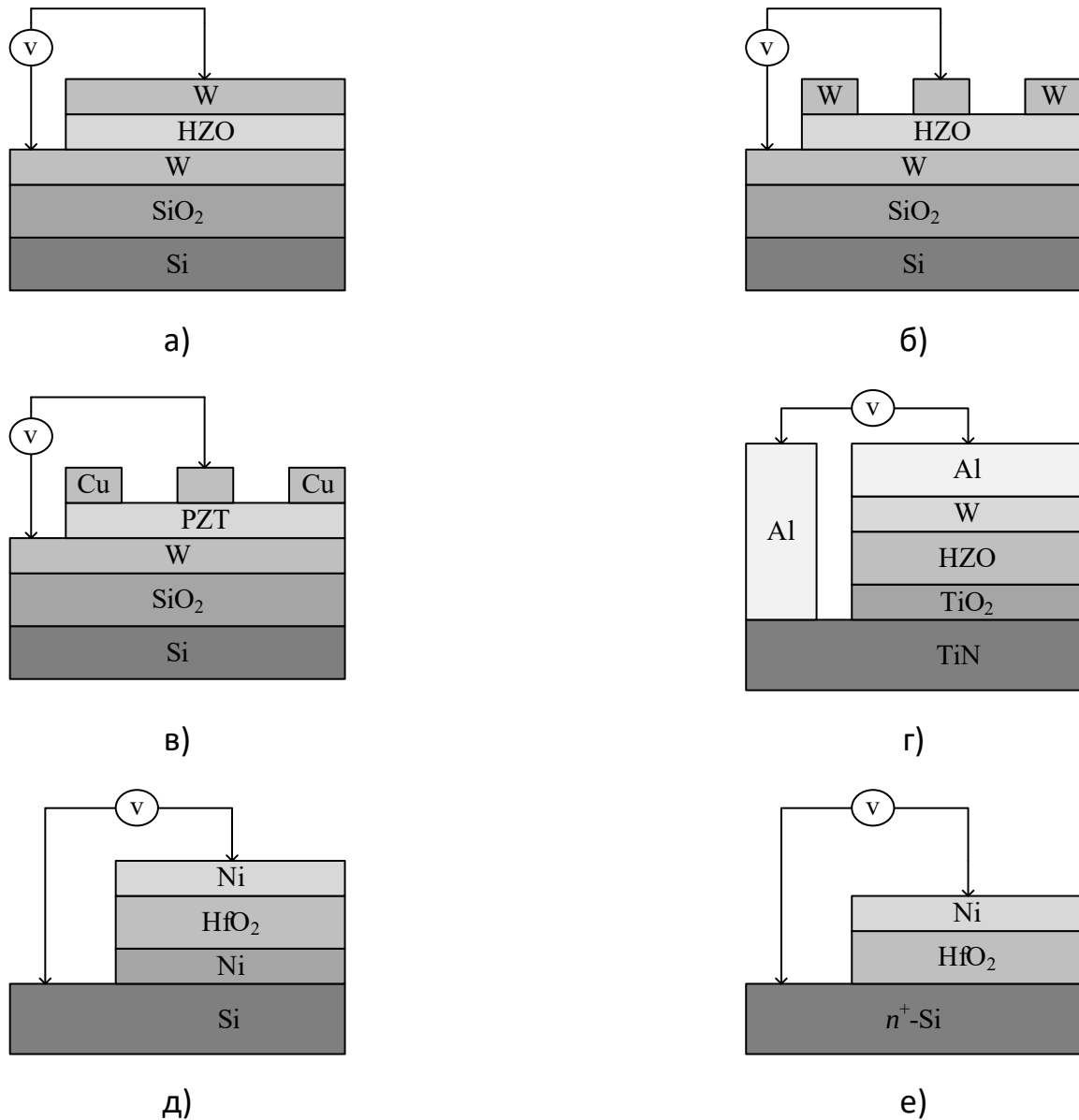
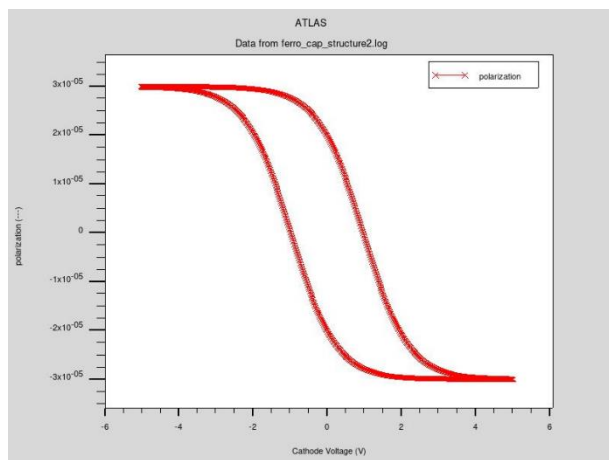


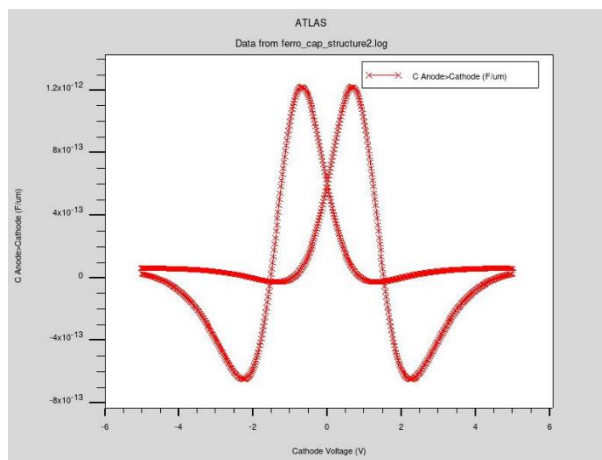
Рис. 1. Исследуемые структуры: а, в – типовые MFM-структуры; б, г – типовые MFIM-структуры; д, е – тестовые структуры на основе кремния и никеля

В качестве входных данных использовались следующие параметры сегнетоэлектрических материалов: коэрцитивная сила (8–25 МВ/см), остаточная поляризация ($5\text{--}30 \cdot 10^{-6}$ Кл/см²) и спонтанная поляризация (20–50). Толщина сегнетоэлектрического слоя составляла 8–12 нм для всех структур, что соответствует требованиям современных технологических норм [3].

Анализ зависимостей поляризации и емкости от напряжения подтвердил сегнетоэлектрическую природу всех исследуемых структур. На рис. 2 приведены типичные характеристики для оптимальной структуры б), демонстрирующие нелинейную зависимость поляризации и наличие области отрицательной емкости. Основные параметры, характеризующие качество рассмотренных структур, представлены в табл. 1. В качестве ключевых показателей выбраны: максимальное значение поляризации ($P_{\max}$), поляризация при нулевом напряжении (P_r), емкость при нулевом напряжении (C_0), максимальная емкость ($C_{\max}$) и напряжение переключения поляризации (V_s).



а



б

Рис. 2. Зависимости поляризации от напряжения (а) и вольт-фарадная характеристика (б) для структуры б)

Таблица 1

Основные параметры промоделированных структур

Структура	$P_{\max}$, Кл/см ²	P_r , Кл/см ²	C_0 , Ф/мкм	$C_{\max}$, Ф/мкм	V_s , В
а)	$3,0 \cdot 10^{-5}$	$2,7 \cdot 10^{-5}$	$4,8 \cdot 10^{-13}$	$7,3 \cdot 10^{-13}$	0,8
б)	$3,0 \cdot 10^{-5}$	$2,0 \cdot 10^{-5}$	$5,0 \cdot 10^{-13}$	$1,2 \cdot 10^{-12}$	1,0
в)	$3,0 \cdot 10^{-5}$	$2,5 \cdot 10^{-5}$	$4,5 \cdot 10^{-13}$	$1,2 \cdot 10^{-13}$	1,3
г)	$3,0 \cdot 10^{-5}$	$2,2 \cdot 10^{-5}$	$3,5 \cdot 10^{-13}$	$3,0 \cdot 10^{-13}$	0,6
д)	$2,5 \cdot 10^{-5}$	$1,7 \cdot 10^{-5}$	$1,8 \cdot 10^{-11}$	$2,6 \cdot 10^{-11}$	0,2
е)	$2,5 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-12}$	$1,6 \cdot 10^{-11}$	1,0

Наиболее выраженный динамический диапазон емкости (изменение более чем в 2 раза) демонстрируют структуры б) и е). Структура б) обладает оптимальным сочетанием параметров: максимальной остаточной поляризацией ($P_r = 2,0 \cdot 10^{-5}$ Кл/см²), низким абсолютным значением емкости ($C_0 = 5,0 \cdot 10^{-13}$ Ф/мкм) и умеренным напряжением переключения ($V_s = 1,0$ В). Это указывает на ее пригодность для практического применения в FeRAM-системах. Структура е), несмотря на худшие характеристики, представляет интерес для калибровочных измерений благодаря технологической простоте изготовления.

ВЫВОДЫ

Проведенное компьютерное моделирование показало, что MFIM-конструкции с HZO-диэлектриком обладают оптимальными параметрами для создания энергонезависимых запоминающих устройств. Структура б) демонстрирует наиболее сбалансированные характеристики, включая высокую остаточную поляризацию, стабильную петлю гистерезиса и выраженную область отрицательной емкости, что подтверждает возможность реализации данного эффекта в практических устройствах.

Работа выполнена при поддержке гранта БРФФИ T25МЭ-012.

Список источников

1. Ishiwara H. Ferroelectric random access memories. DOI:10.1166/jnn.2012.6651 // Journal of nanoscience and nanotechnology. 2012. Vol. 12, № 10. P. 7619–7627.
2. The fundamentals and applications of ferroelectric HfO₂ / U. Schroeder et al. DOI:10.1038/s41578-022-00431-2 // Nature Reviews Materials. 2022. Vol. 7, № 8. P. 653–669.
3. Enhancing the Capacitive Memory Window of HZO FeCap Through Nanolaminate Stack Design / M. Habibi et al. DOI:10.1002/aelm.202400764 // Advanced Electronic Materials. 2025. Vol. 11, № 8.

**ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАДИОИМПУЛЬСНЫХ
ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ НА ОСНОВЕ
АКУСТООПТИЧЕСКИХ ЯЧЕЕК**

ОЛЕЙНИКОВ Андрей Владимирович, аспирант
Воронежский государственный университет
394018, Россия, Воронеж, ozverinka@gmail.com

УСКОВ Григорий Константинович,
доктор физико-математических наук, профессор,
заведующий кафедрой электроники
Воронежский государственный университет
394018, Россия, Воронеж, uskov@phys.vsu.ru

БОБРЕШОВ Анатолий Михайлович, доктор
физико-математических наук, профессор кафедры электроники
Воронежский государственный университет
394018, Россия, Воронеж, bobreshov@phys.vsu.ru

Аннотация. Рассмотрена система, состоящая из двух акустооптических ячеек с разными кристаллами, предназначенная для измерения длительности и периода повторения импульсов. Приведены блок-схема и алгоритм измерений.

Ключевые слова: акустооптическое преобразование, импульсный сигнал, дифракция Брэгга, преобразование Фурье, постоянная акустооптического взаимодействия.

**NEW DIRECTIONS OF TEACHING METHODS
FOR UNDERGRADUATES**

OLEINIKOV Andrey Vladimirovich, PhD student
Voronezh State University
394018, Russia, Voronezh, ozverinka@gmail.com

USKOV Grigory Konstantinovich,
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor,
Head at the Department of Electronics
Voronezh State University
394018, Russia, Voronezh, , uskov@phys.vsu.ru

BOBRESHOV Anatoly Mikhailovich, Doctor of Physical
and Mathematical Sciences, Professor at the Department of Electronics
Voronezh State University
394018, Russia, Voronezh, bobreshov@phys.vsu.ru

Abstract. Using two acousto-optic crystals with different cell constants allows, under certain conditions, the measurement of pulse train parameters: pulse duration and repetition period. An example of the measurement process is described and provided.

Keywords: acousto-optic transformation, pulse signal, Bragg diffraction, Fourier transform, acousto-optic interaction constant.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время активно развивается разработка многоканальных приемных систем, базирующихся на современных достижениях технологии изготовления преселекторов и фильтров на поверхностных и объемных акустических волнах [1, 2]. Преимущества таких входных устройств заключаются в возможности увеличения быстродействия обработки сигналов и повышении их помехоустойчивости. Этому способствовало появление новой элементной базы, прогрессивных технических решений при создании систем связи [3, 4, 5]. Развитием существующих и поиском новых решений по измерению параметров сигналов интенсивно и систематически занимаются как у нас в стране, так и за рубежом [1, 6, 7]. Поэтому совершенствование методик измерения параметров радиоимпульсов является актуальной задачей [7–10].

РЕЗУЛЬТАТЫ

В данной работе предложена методика определения параметров импульсных последовательностей на основе использования двух акустооптических кристаллов с различными скоростями распространения акустических волн. Величины этих скоростей определяют время прохождения акустической волны через зону взаимодействия и, соответственно, значение постоянной ячейки τ .

Последняя также зависит и от размера области взаимодействия, которая определяется диаметром лазерного луча.

Блок-схема измерения представлена на рис. 1. Луч лазера разделяется системой зеркал равного хода для обеспечения когерентности лучей, падающих на кристаллы. Дополнительно для ячейки с большим значением τ_1 использован коллиматор с целью изменения диаметра луча для возможности увеличения области взаимодействия. Генератор формирует последовательность радиоимпульсов с частотой заполнения $f = 70$ МГц. Частота периода повторения задается блоком управления. Сигналы генератора поступают на преобразователи ячейки, возбуждающие акустическую волну. Дифракционная картина, формируемая нижним кристаллом, регистрируется веб-камерой. На выходе верхнего кристалла установлена собирающая линза и фотодиод с целью определения интенсивности отклоненного излучения. Данные с веб-камеры и фотодиода передаются в блок управления и обработки.

При проведении эксперимента использованы ячейки с кристаллами ниобата лития и парателлурита, для которых постоянные времени τ_1 и τ_2 , с учетом размера лазерного луча, соответственно равны 8 мкс и 700 мкс.

Для оценки точности измерений используем тестовый сигнал с длительностью импульса $\tau_{\text{и}} = 1$ мкс и периодом повторения $T = 20$ мкс.

В основе алгоритма лежит анализ интенсивности дифракционной картины для дифракции Брэгга. Для рассматриваемого сигнала в области взаимодействия ячейки с парателлуритом ($\tau_2 = 700$ мкс) в любой момент времени присутствуют 35 периодов повторения радиосигнала. При этом основные компоненты спектра располагаются на частотах кратных периоду повторения. В соответствии с алгоритмом определяются частоты двух соседних локальных максимумов, а по их частотной разнице вычисляется искомый период повторения радиоимпульсов.

В результате измерения и обработки, включая усреднение данных, на выходе блока управления и обработки формируются значения частоты следования радиоимпульсов и их периода, которые соответственно равны ~ 50 кГц и ~ 20 мкс. Точность полученных результатов по отношению к исходным составила 0,1 %.

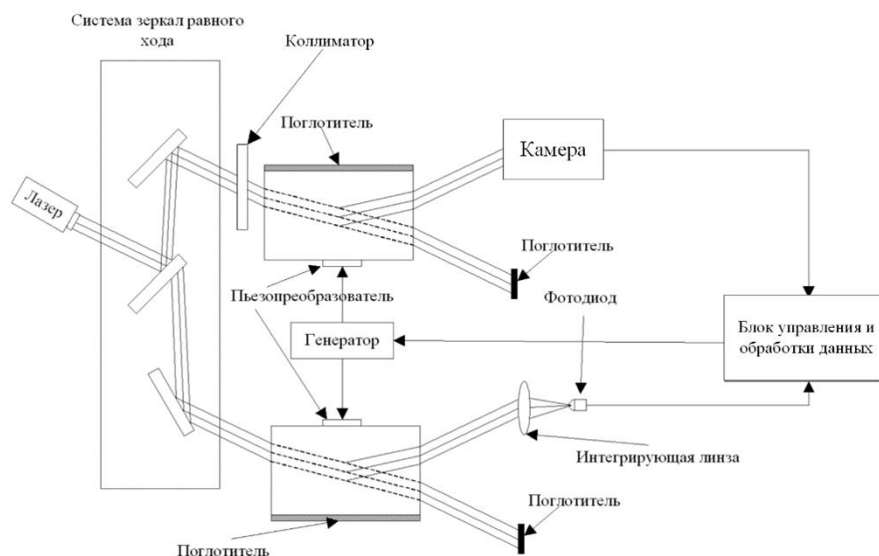


Рис. 1. Схема измерения с использованием двух кристаллов, с разными значениями постоянной АО взаимодействия

Параллельно с этим в нижнем канале с ячейкой на основе ниобата лития ($\tau_1 = 8 \text{ мкс}$) проводится автоматическое измерение длительности импульса $\tau_{\text{и}}$. В этом случае период повторения тестового сигнала значительно превышает время распространения акустической волны через область акустооптического взаимодействия. Поэтому в этой области в определенные моменты времени будет находиться одиночный радиоимпульс. Отсюда величина интенсивности дифракционной картины будет определяться только длительностью импульса при заданной амплитуде акустического сигнала, что позволяет по значению интенсивности определить длительность импульса [11]. С этой целью используется фотодиод для измерения полной интенсивности отклоненного луча. Только ее наибольшие значения будут соответствовать случаю нахождения импульса в области взаимодействия. Величина интенсивности находится в пропорциональной зависимости с длительностью импульса радиосигнала. Для проверки и подтверждения полученного результата в блоке обработки сохраняются все отсчеты интенсивности за время измерения. Усреднив значения отсчетов за период, измеренный в нижнем канале блок-схемы, можно вычислить амплитуду импульса. Рассмотрим порядок вычислений длительности для нашего импульса.

Для импульса с длительностью $\tau_{\text{и}} = 1$ мкс измеренное значение, пропорциональное максимальной интенсивности падающего излучения, составило 189 мВ, а его среднее значение за период повторения 23,65 мВ. Данные по напряжению снимались с частотой $2/\tau_1$, что определило наличие двух отсчетов АЦП на выборку длительностью τ_1 . И при этом способе измерений длительность импульса составила $\tau_1(23,65/189) = 1,001$ мкс при сохранении точности 0,1 %.

ВЫВОДЫ

Очевидно, что область применения этой методики ограничена соотношениями между длительностью и периодом повторения импульса и значениями постоянных времени кристаллов. Для расширения области применения предложенной методики возможно использовать многоканальную систему с бóльшим количеством акустооптических ячеек, материалы которых имеют разные значения постоянных τ . В соответствии с этим появится возможность измерять частоту повторения и длительность импульсов в широком диапазоне.

Список источников

1. Шибаев С. С., Помазанов А. В., Вольфовский Б. Н. Акустооптические процессоры. Алгоритмы и погрешности измерений : учеб. пособие. Москва : Юрайт; 2021. 214 с. (Высшее образование). ISBN: 978-5-534-04489-8.
2. Вишняков А. В. Анализ особенностей конструкции дефлектора на основе монокристалла парателлурита // Информационные приоритеты и экономические ориентиры социального развития регионов России : сб. материалов Всероссийской научн.-практ. конф., Ставрополь, 28–29 мая 2020 года. Ставрополь : Агрус, 2020. С. 75–82.
3. Антонов С. Н. Акустооптические устройства на основе многолучевой дифракции // Приборы и техника эксперимента. 2020. № 6. С. 46–52
4. Оптоэлектронные приборы на основе дифракционных решеток от стоячих упругих волн / К. В. Важдаев [и др.] // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2022. Т. 18, № 3–4. С. 151–158.

5. Григорьев Л. В. Акустоэлектроника и акустооптика в гидроакустике // Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики : тр. всероссийской конф. Санкт-Петербург, 14–16 сентября 2022 года. Санкт-Петербург : Издательство «ЛЕМА», 2023. С. 31–36.
6. Gasanov A. R., Gasanov R. A., Rustamov A. R. Acoustooptic Methods and Tools for Measuring Parameters of Optoelectronic Devices. DOI: <https://doi.org/10.3103/S0735272722060048> // Radioelectronics Communications Systems. 2022. № 65. P. 305–316.
7. Optoelectronic Device for Measuring Radio Signal Samples and Evaluating Its Accuracy Characteristics / O. A.Safaryan et al. DOI:10.3390/eng4010016 // Eng. 2023. Vol. 4, No.1. P. 276–284.
8. Костылева Е. И., Манцевич С. Н. Влияние полосы согласования акустооптической ячейки на спектральный состав акустического импульса // Волновая электроника и инфокоммуникационные системы : сб. ст. XXVIII Междунар. научн. конф., Санкт-Петербург, 12–16 мая 2025 года. Ч. 3. Санкт-Петербург : ГУАП, 2025. С. 82–85.
9. Поликарпова Н. В., Пожар В. Э. Исследование частотного диапазона работы пьезоэлектрического преобразователя акустооптического фильтра электрическим и оптическим методами. DOI: 10.31857/S0320791924020061 // Акустический журнал. 2024. Т. 70, № 2. С. 186–192.
10. Казаков В. И., Москалец О. Д., Хомутов А. С. Спектрометр на базе акустооптического перестраиваемого фильтра для бесконтактного спектрального контроля в экстремальных условиях // Волновая электроника и инфокоммуникационные системы : сб. ст. XXIII междунар. научн. конф., Санкт-Петербург, 01–05 июня 2020 года. Ч. 1. Санкт-Петербург : ГУАП, 2020. С. 27–36.
11. Приемник импульсных сигналов на основе акустооптической ячейки / А. М. Бобрешов [и др.] // Радиотехника. 2019. № 3. С. 58–62.

**ВОЗМОЖНОСТИ УМЕНЬШЕНИЯ УРОВНЯ ОТРАЖЕННОЙ
МОЩНОСТИ ОТ ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ
МЕТАМАТЕРИАЛА ИЗ ХИ-ОБРАЗНЫХ ЧАСТИЦ**

ОСИПОВ Олег Владимирович, доктор физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой «Высшая математика»
*Поволжский государственный университет
телекоммуникаций и информатики
443010, Россия, Самара, o.osipov@psuti.ru*

СИМАКОВА Анастасия Сергеевна, студент
*Поволжский государственный университет
телекоммуникаций и информатики
443010, Россия, Самара, a.simakova@psuti.ru*

Аннотация. В работе рассмотрена возможность уменьшения уровня обратного отражения электромагнитной волны от планарного кирального покрытия на основе равномерно расположенных проводящих частиц хи-образной формы. В работе было получено решение в виде системы линейных алгебраических уравнений относительно неизвестных коэффициентов отражения и прохождения для случая, когда киральное покрытие было расположено на диэлектрической подложке.

Ключевые слова: метаматериал, киральность, дисперсия, диэлектрическая проницаемость, математическая модель.

**POSSIBILITIES OF REDUCING THE LEVEL OF REFLECTED
POWER FROM A COATING BASED ON A METAMATERIAL
OF CHI-SHAPED PARTICLES**

OSIPOV Oleg Vladimirovich,
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor,
Head at the Department of Higher Mathematics
*Povolzhckiy State University of Telecommunications and Informatics
443010, Russia, Samara, o.osipov@psuti.ru*

SIMAKOVA Anastasia Sergeevna, student
*Povolzhckiy State University of Telecommunications and Informatics
443010, Russia, Samara, a.simakova@psuti.ru*

Abstract. This paper considers the possibility of reducing the level of electromagnetic wave back reflection from a planar chiral coating based on uniformly distributed chiral conductive particles. The paper derives a solution in the form of a system of linear algebraic equations for the unknown reflection and transmission coefficients for the case where the chiral coating is located on a dielectric substrate.

Keywords: metamaterial, chirality, dispersion, permittivity, mathematical model.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время активно изучаются киральные метаматериалы (КММ) СВЧ диапазона [1–2]. Они находят широкое применение для создания новой компонентной базы СВЧ с целью обеспечения частотной и поляризационной селективности устройств. Одним из применений КММ является их использование для создания покрытий с частотно селективным уменьшением уровня отраженной мощности. Эти возможности обусловлены наличием в структуре КММ резонансных частиц зеркально асимметричной формы и дисперсией материальных параметров КММ.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В работе рассматривается КММ, состоящие из равномерной двумерной матрицы, в узлах которой размещаются хаотически ориентированные проводящие элементы в виде ортогональной проводящей прямоугольной полосы и криволинейной полосы в виде латинской буквы S. Такой элемент будем называть ХИ-частицей в силу ее пространственной схожести с буквой греческого алфавита. Геометрия задачи приведена на рис. 1.

В рассматриваемом КММ значительную роль играет наличие дисперсии диэлектрической проницаемости [3, 4]:

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_c + \frac{\Omega_\varepsilon \omega_0^2}{\omega_0^2 - \omega^2 + i\omega\gamma}, \quad (1)$$

где ε_c – диэлектрическая проницаемость; ω_0 – резонансная частота ХИ-элемента; γ – относительный фактор затухания; Ω_ε – уровень диэлектрического резонанса.

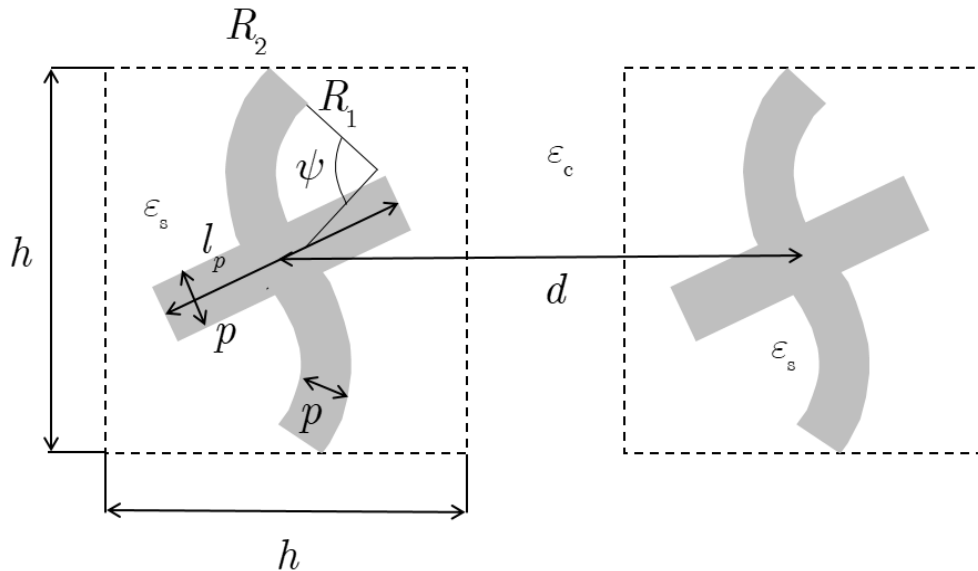


Рис. 1. XII-элемент

Также в работе была учтена дисперсия киральности:

$$\chi(\omega) = \frac{\Omega_\chi \omega_0 \omega}{\omega_0^2 - \omega^2 + i\omega\gamma}, \quad (2)$$

где Ω_χ – уровень кирального резонанса.

Резонансная частота определялась в квазистационарном приближении:

$$\begin{aligned} \omega_0 &= \frac{c}{\sqrt{\epsilon_c \mu_c}} \frac{1}{\sqrt{L_{ce} C_{ce}}}; \\ L_{ce} &= \left(1 + \frac{K}{4}\right) \left\{ \frac{\sqrt{2} R^2}{8\pi p} + 2l_p \left[\ln\left(\frac{2l_p}{p}\right) + \frac{3}{4} \right] \right\}; \\ C_{ce} &= p \left(\frac{1}{d_s} + \frac{1}{d} \right) \beta(\psi); \beta(\psi) = \psi R + l_p; \\ R &= \frac{1}{2} \sum_{k=1}^2 R_k. \end{aligned} \quad (3)$$

где c – скорость света; K – коэффициент взаимодействия по магнитному полю между соседними XII-частицами.

В работе было рассмотрено падение плоской электромагнитной волны линейной поляризации на планарный слой КММ (область '2'), расположенный на диэлектрической подложке (область '3'). Геометрия задачи показана на рис. 2.

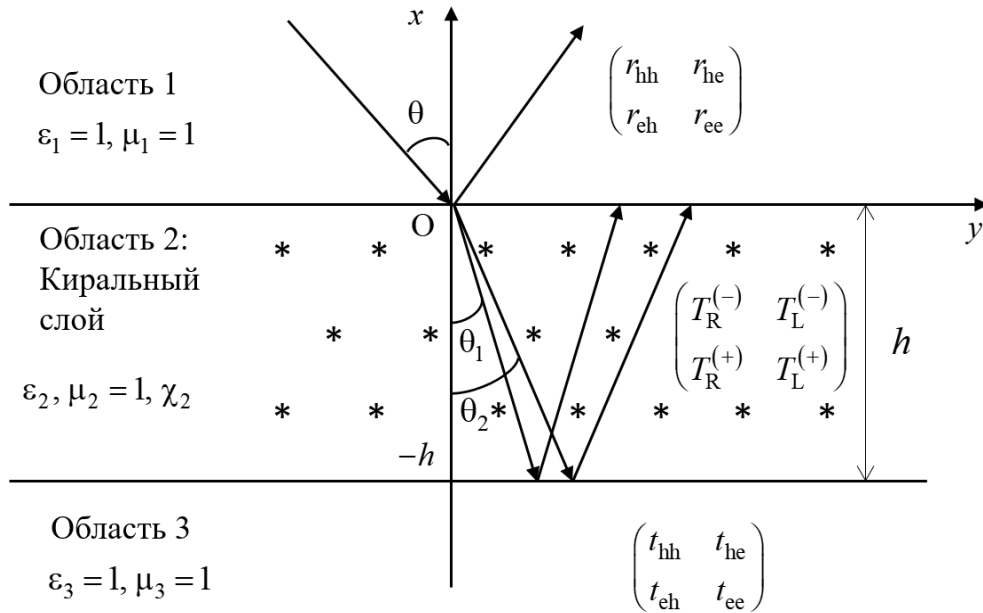


Рис. 2. Геометрия задачи

На структуру падала волна с перпендикулярной поляризацией, составляющие векторов поля которой имеют вид:

$$E_z^{(\text{ind})} = e^{-ik_1(-x \cos \theta + y \sin \theta)}; \quad H_y^{(\text{ind})} = \frac{\cos \theta}{\eta_1} e^{-ik_1(-x \cos \theta + y \sin \theta)}, \quad (4)$$

где $k_1 = k_0 \sqrt{\epsilon_1 \mu_1}$ — волновое число для волны в области 1; $\eta_1 = \sqrt{\mu_1 / \epsilon_1}$; θ — угол падения волны на планарный слой КММ.

Задача решалась методом частичных областей с учетом возникновения кросс-поляризации в областях `1` и `3`, а также распространения волн с право и левокруговыми поляризациями в слое `2`. В результате с использованием граничных условий на границах `1–2` и `2–3` относительно неизвестных коэффициентов отражения и прохождения была получена следующая система линейных алгебраических уравнений с решением вида:

$$\vec{\mathbf{X}}_E = (\mathbf{A}_E)^{-1} \cdot \vec{\mathbf{B}}_E. \quad (5)$$

где $\vec{\mathbf{X}}_E = [T_R^{(-)}, T_R^{(+)}, T_L^{(-)}, T_L^{(+)}, r_{ee}, r_{eh}, t_{ee}, t_{eh}]^T$, $\vec{\mathbf{B}}_E = [1, 0, 0, \eta_1^{-1} \cos \theta, 0, 0, 0, 0]^T$.

На рис. 3 приведены частотные зависимости отраженной и прошедшей мощностей при падении волны перпендикулярной поляризации на КММ-покрытие в диапазоне частот от 2 до 3 ГГц при нормальном падении волны при значении относительной диэлектрической проницаемости $\epsilon_3 = 12$.

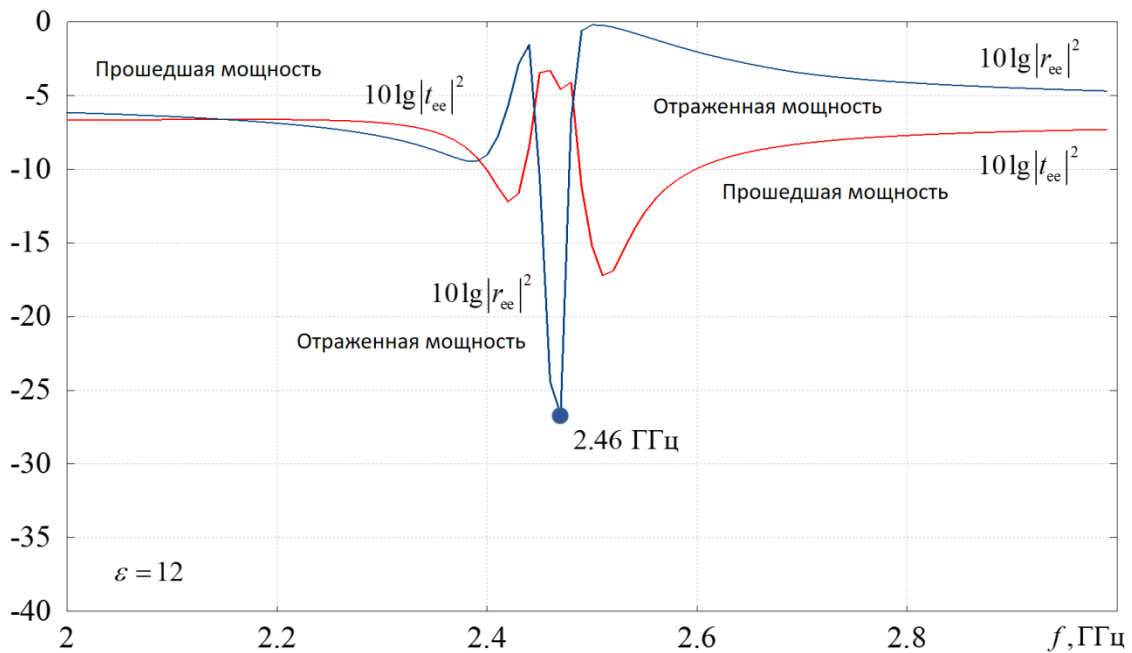


Рис. 3. Графики зависимости прошедшей и отраженной мощностей от слоя ХИ-КММ на диэлектрической подложке

Из рис. 3 видно, что вблизи частоты 2.46 ГГц возникает ослабление отраженной мощности (до 28 дБ), то есть метаматериал в этом диапазоне значительно уменьшает уровень обратного отражения при нормальном падении волны.

ВЫВОДЫ

В работе показано, что в планарном слое КММ на основе ХИ-частиц возникает резонансное взаимодействие падающей электромагнитной волны с равномерной матрицей из ХИ-частиц, в результате которого на ряде дискретных частот возможно значительное резонансное ослабление уровня отраженной мощности.

Список источников

1. Electromagnetic waves in chiral and bi-isotropic media / I. V. Lindell et al. London : Artech House, 1994. 324 p.
2. A Review on Metamaterials for Device Applications / S. N.Kumar et al. DOI:10.3390/cryst11050518 // Crystals. 2021. № 11. P. 518.

3. Zhao R., Koschny T., Soukoulis C. M. Chiral metamaterials : retrieval of the effective parameters with and without substrate. DOI:10.1364/OE.18.014553 // Optics express. 2010. Vol. 18, №. 14. P. 14553-14567.

4. Sihvola A. H. Temporal dispersion in chiral composite materials : A theoretical study // Journal of electromagnetic waves and applications. 1992. Vol. 6, №. 9. P. 1177-1196.

**ПРИБЛИЖЕННЫЕ УСЛОВИЯ ДЛЯ СЛОЯ КИРАЛЬНОГО
МЕТАМАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ S-ЧАСТИЦ
С УЧЕТОМ МАТЕРИАЛЬНОЙ ДИСПЕРСИИ**

ОСИПОВ Олег Владимирович, доктор физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой «Высшая математика»

Поволжский государственный университет

телекоммуникаций и информатики

443010, Россия, Самара, o.osipov@psuti.ru

СПИРОВ Денис Станиславович, аспирант

Поволжский государственный университет

телекоммуникаций и информатики

443010, Россия, Самара, d.spirov@psuti.ru

Аннотация. В работе приведен вывод приближенных граничных условий 1-го и 2-го типов для планарного кирального слоя на основе равномерной матрицы из хаотически ориентированных проводящих элементов S-типа. При выводе была учтена дисперсионная модель рассматриваемого метаматериала, а также учтено электрическое и магнитное взаимодействие между соседними S-частицами.

Ключевые слова: метаматериал, киральность, дисперсия, приближенные граничные условия, математическая модель.

**APPROXIMATE CONDITIONS FOR A LAYER OF CHIRAL
METAMATERIAL BASED ON S-PARTICLES TAKING
INTO ACCOUNT MATERIAL DISPERSION**

OSIPOV Oleg Vladimirovich,

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor,

Head at the Department of Higher Mathematics

Povolzhskiy State University

of Telecommunications and Informatics

443010, Russia, Samara, o.osipov@psuti.ru

SPIROV Denis Stanislavovich, PhD student

Povolzhskiy State University

of Telecommunications and Informatics

443010, Russia, Samara, d.spirov@psuti.ru

Abstract. This paper presents the derivation of approximate Type 1 and Type 2 boundary conditions for a planar chiral layer based on a uniform matrix of randomly oriented S-type conducting elements. The derivation takes into account the dispersion model of the metamaterial under consideration, as well as the electrical and magnetic interactions between adjacent S-particles.

Keywords: metamaterial, chirality, dispersion, approximate boundary conditions, mathematical model.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время интерес представляет расчет структур СВЧ, содержащих слои из киральных метаматериалов (КММ), обладающих конечными размерами. Вообще говоря, получение строгих выражений для векторов поля в ограниченных киральных средах является не разрешимой задачей и, как следствие, требуется разработка методов приближенного анализа таких структур. Одним из таких методов являются приближенные граничные условия для тонкого кирального слоя [1, 2]. Недостатками указанных условий является отсутствие учета в них материальной дисперсии, а также невозможность их использования для сравнимых с длиной волны по толщине киральных слоев.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В предлагаемой работе рассматривается киральный метаматериал, состоящий из равномерно распределенной совокупности хаотически ориентированных частиц S-образной формы. Структура частиц приведена на рис. 1.

Дисперсия диэлектрической проницаемости учитывалась по модели Лоренца [3, 4]:

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_c + \frac{\Omega_\varepsilon \omega_0^2}{\omega_0^2 - \omega^2 + i\omega\gamma}, \quad (1)$$

где $\varepsilon(\omega)$ – частотно зависящая эффективная диэлектрическая проницаемость; ω_0 – резонансная частота S-элемента; γ – относительный фактор затухания; Ω_ε – уровень диэлектрического резонанса.

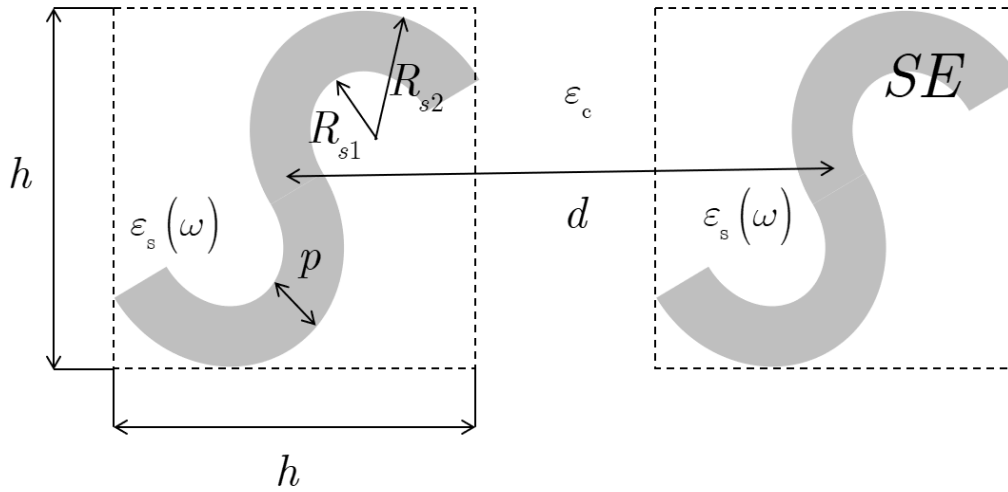


Рис. 1. S-элемент

Дисперсия киральности учитывалась по модели Кондона:

$$\chi(\omega) = \frac{\Omega_\chi \omega_0 \omega}{\omega_0^2 - \omega^2 + i\omega\gamma}, \quad (2)$$

где Ω_χ – уровень кирального резонанса.

Резонансная частота S-элемента:

$$\omega_0 = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_c \mu_c}} \frac{1}{\sqrt{L_{se} C_{se}}}; \quad L_{se} = \left(1 + \frac{K}{4}\right) \frac{\sqrt{2} R^2}{8\pi p}; \quad (3)$$

$$C_{se} = \frac{p}{d_s} \beta(\psi); \quad \beta(\psi) = \psi R + l_p; \quad R = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^2 R_k.$$

где c – скорость света; K – коэффициент взаимодействия по магнитному полю между соседними S-частицами.

Геометрия для вывода приближенных граничных условий приведена на рис. 2. Для общности рассматривается киральный слой с формой поверхности, которая может быть описана с использованием ортогональных криволинейных координат. Вывод условий основан на использовании уравнений Максвелла в интегральной форме.

Векторы поля в киральном слое аппроксимируются линейно по двум известным значениям на границах областей. Векторы индукций электрического и магнитного полей определяются материальными уравнениями для киральной

среды. В общем случае приближенные граничные условия для слоя КММ, расположенного между двумя диэлектрическими областями, записываются в виде следующих функциональных соотношений:

$$\hat{\mathbf{L}}_k \left[\partial^2 / \partial u^2, \partial^2 / \partial v^2, \varepsilon(\omega), \chi(\omega), F_k \right] \begin{pmatrix} \Psi_k^{(1)} \\ \Psi_k^{(2)} \end{pmatrix} = 0; \quad (4)$$

$$(k = 1, 2, 3, 4),$$

где $\hat{\mathbf{L}}_k$ – дифференциальные операторы 2-го порядка, в структуру которого входят дисперсионные зависимости $\varepsilon(\omega), \chi(\omega)$, а также контурные функции F_k , определяющие форму поверхности слоя; u и v – тангенциальные координаты; $\Psi_k^{(1,2)}$ – векторы, образованные 4 тангенциальными составляющими векторов напряженностей электрического и магнитного полей в областях '1' и '2'. Условия (4) учитывают кросс-поляризацию поля.

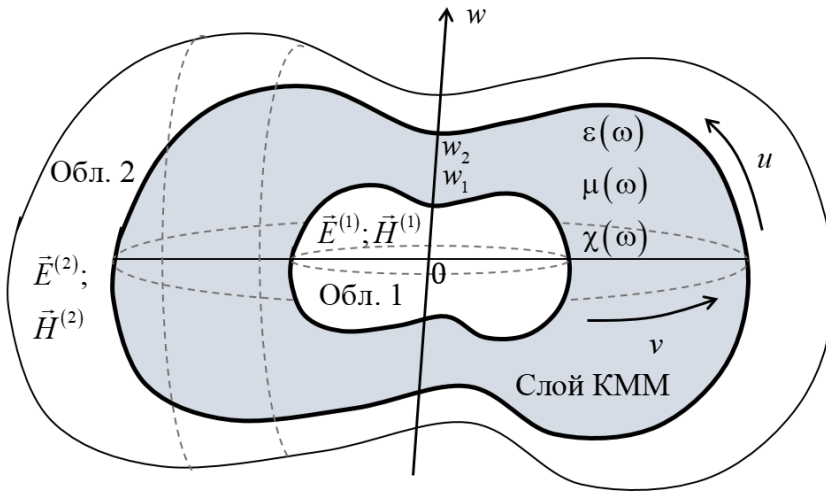


Рис. 2. Обобщенная геометрия

Если область под слоем КММ представляет собой идеальный проводник, на поверхности которого $\vec{E}_\tau = 0$, то из (4) получаются приближенные условия 2-го типа:

$$\hat{\mathbf{L}}_k \left[\partial^2 / \partial u^2, \partial^2 / \partial v^2, \varepsilon(\omega), \chi(\omega), F_k \right] \begin{pmatrix} \Psi_v^{(1)} \\ \Psi_u^{(1)} \end{pmatrix} = 0; \quad (5)$$

$$(k = 1, 2).$$

Заметим, что данный подход позволил получить матрицу передачи тонкого кирального слоя 4x4:

$$\mathbf{M}(\omega) = \begin{bmatrix} 1 & -k_0 w \chi(\omega)(1 - \beta^2(\omega)) & 0 & i\mu k_0 w(1 + \beta^2(\omega)) \\ -k_0 w \chi(\omega) & 1 & i\mu k_0 w & 0 \\ 0 & -i\varepsilon(\omega)k_0 w(1 + \beta^2(\omega)) & 1 & -k_0 w \chi(\omega)(1 - \beta^2(\omega)) \\ -ik_0 w \varepsilon(\omega) & 0 & -k_0 w \chi(\omega) & 1 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

где w – толщина слоя; $k_0 = \omega/c$; $\beta(\omega) = k_u^2 / \left[k_0^2 (\varepsilon(\mu)\mu - \chi^2(\omega)) \right]$; k_u – волновое число для волны, распространяющейся вдоль оси Ou ; μ – относительная магнитная проницаемость кирального слоя.

Если киральный слой разбить на N слоев с матрицами передачи $\mathbf{M}_k(\omega)$, то матрицу передачи всего слоя можно представить следующим образом:

$$\mathbf{M}(\omega) = \prod_{k=1}^N \mathbf{M}_k(\omega). \quad (7)$$

Тогда решение задачи об отражении и прохождении волны от слоя КММ будет сведено к следующему матричному соотношению:

$$\Psi_k^{(2)} = \mathbf{M}(\omega) \Psi_k^{(1)}; \quad (k = 1, 2, 3, 4). \quad (7)$$

ВЫВОДЫ

В работе получены приближенные граничные условия для кирального слоя на основе матрицы S-образных элементов с учетом материальной дисперсии. Получены условия двух типов, когда слой КММ расположен между двумя произвольными областями и на поверхности идеального проводника. Предложен алгоритм разбиения кирального слоя на подслои с учетом локальных матриц передачи, позволяющий увеличить допустимую толщину слоя КММ при использовании в рассмотренных граничных условиях.

Список источников

1. Неганов В. А., Осипов О. В. Приближенные граничные условия для тонкого кирального слоя, расположенного на идеально-проводящей плоскости // Радиотехника и электроника. 2005. Т. 50, № 3. С. 292–297.
2. Неганов В. А., Осипов О. В., Панфёрова Т. А. Приближенные граничные условия для круглого идеально проводящего стержня в тонкой цилиндрической киральной оболочке // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2007. Т. 10, № 1. С. 14–20.
3. Zhao R., Koschny T., Soukoulis C. M. Chiral metamaterials : retrieval of the effective parameters with and without substrate. DOI:10.1364/OE.18.014553 // Optics express. 2010. Vol. 18, №. 14. P. 14553-14567.
4. Sihvola A. H. Temporal dispersion in chiral composite materials : A theoretical study // Journal of electromagnetic waves and applications. 1992. Vol. 6, №. 9. P. 1177-1196.

**ОПЕРАЦИОННЫЙ УСИЛИТЕЛЬ НА ОСНОВЕ
АРСЕНИД-ГАЛЛИЕВОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО
ПРОЦЕССА С ПОВЫШЕННЫМ КОЭФФИЦИЕНТОМ
УСИЛЕНИЯ ПО НАПРЯЖЕНИЮ**

ПАХОМОВ Илья Викторович, доцент

Институт перспективного машиностроения «Ростсельмаш»

Донской государственный технический университет

344000, Россия, Ростов-на-Дону, ipahomov@donstu.ru

БЕЗБОРОДОВ Никита Александрович, ассистент

Институт сферы обслуживания и предпринимательства

(филиал) Донского государственного технического университета

346500, Россия, Шахты, nikita.bezborodov@ro.ru

Аннотация. В статье приведены результаты исследований новой схемы операционного усилителя (ОУ) на основе арсенид-галлиевых nJFet и биполярных рnp-транзисторов. Показаны результаты моделирования логарифмической амплитудно-частотной характеристики коэффициента усиления по напряжению ОУ и статического режима транзисторов. На примере двух вариантов включения ОУ рассмотрена возможность применения разработанной схемы в практических приложениях (инвертирующих и неинвертирующих сумматорах потенциальных сигналов).

Ключевые слова: операционный усилитель, GaAs, сумматор входных напряжений, неинвертирующий усилитель, коэффициент усиления по напряжению, GaAs nJFET, GaAs рnp биполярный транзистор, LTspice.

**OPERATIONAL AMPLIFIER BASED
ON GA-AS TECHNOLOGY WITH HIGH VOLTAGE GAIN**

PAKHOMOV Ilya Viktorovich, Associate Professor

Institute of Advanced Mechanical Engineering «Rostselmash»

Don State Technical University

344000, Russia, Rostov-on-Don, ipahomov@donstu.ru

BEZBORODOV Nikita Aleksandrovich, Assistant

Institute of Services and Entrepreneurship (branch)

of the Don State Technical University

346500, Russia, Shakhty, nikita.bezborodov@ro.ru

Abstract. This paper presents the results of computer simulation studies of a new GaAs operational amplifier (op amp) circuit. Simulation results for the voltage gain frequency response and static operating mode of the circuit are shown. Using two op amp circuit examples, the feasibility of using the developed op amp circuit in practical applications is demonstrated.

Keywords: GaAs, operational amplifier, input voltage summator, non-inverting amplifier, LTspice, voltage gain, JFET.

ВВЕДЕНИЕ

Разработка новых микросхем на основе GaAs транзисторов обусловлена их уникальными физико-техническими характеристиками, такими как высокая радиационная стойкость и способность работать при экстремально низких (до $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$) и высоких (до $300\text{ }^{\circ}\text{C}$) [1–9] температурах.

Эти свойства позволяют использовать GaAs-микросхемы там, где их кремниевые аналоги неэффективны, например, в аэрокосмической и ядерной отраслях, где автоматика и радиоэлектронная аппаратура работают в экстремальных радиационных и температурных условиях [10].

Преимущества ОУ на основе GaAs перевешивают их недостатки, такие как высокая стоимость, оправдывая затраты на разработку и производство. Новые схемы по GaAs технологии расширяют применение аналоговых интегральных схем в областях с высокими требованиями к надежности и устойчивости к экстремальным внешним воздействиям.

GaAs ОУ с тремя высокоимпедансными узлами

На рис. 1 показана схема предлагаемого ОУ на GaAs транзисторах с тремя высокоимпедансными узлами (Σ_1 , Σ_2 , Σ_3), обеспечивающая высокий коэффициент усиления по напряжению. Исследования проведены с использованием компьютерных моделей Дворникова О. В. (Минский научно-исследовательский приборостроительный институт) [1].

Рассматриваемый ОУ реализуется по так называемой совмещенной технологии [1]. Ее ключевая особенность – разрешенное использование только двух типов транзисторов:

1. nJFET с управляющим p-n переходом – полевых транзисторов с высокой подвижностью электронов;
2. GaAs p-n-p биполярных транзисторов (pnpHBTsub).

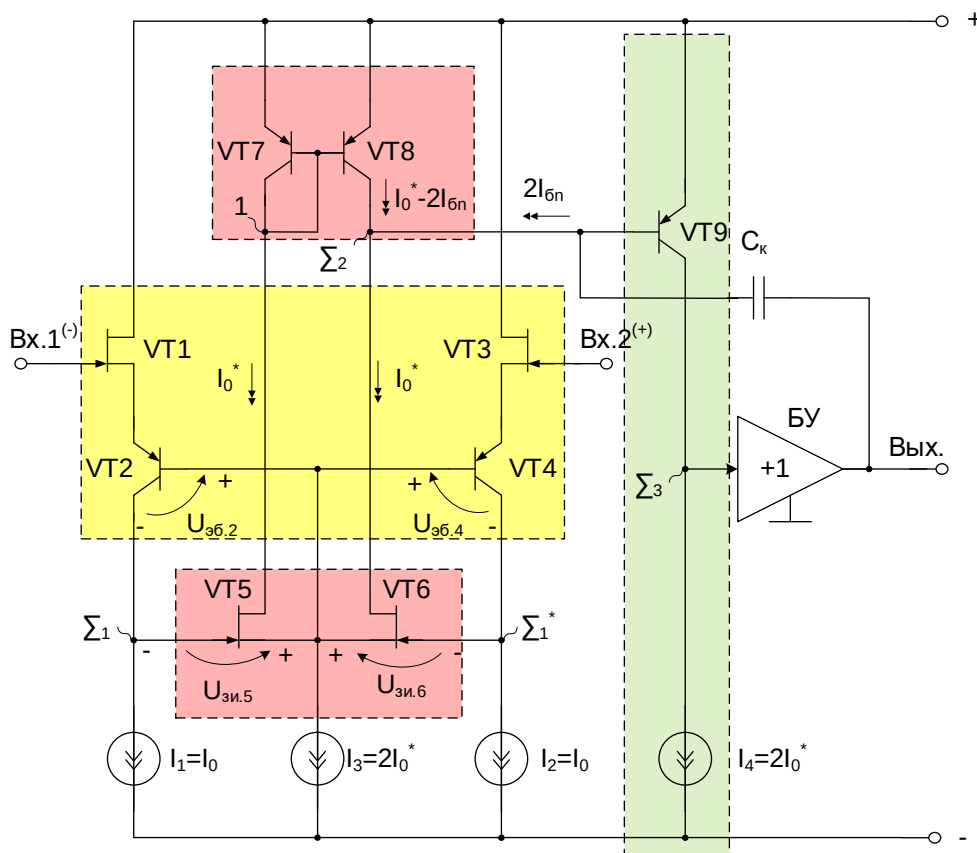


Рис. 1. GaAs ОУ с тремя высокоимпедансными узлами

Результаты моделирования статического режима схемы ОУ, приведенные на рис. 2, показывают, что при идеальном буферном усилителе (БУ) с коэффициентом передачи, близким к единице $K_{\text{п}}=1$ и глубокой отрицательной обратной связью на неинвертирующий вход $\text{Вх.1}^{(-)}$, систематическая составляющая напряжения смещения нуля крайне мала ($U_{\text{см}} \approx 650$ нВ). Это обеспечивается высокой симметрией первого и второго каскадов усиления. График логарифмической амплитудно-частотной характеристики (ЛАЧХ) коэффициента усиления по напряжению (K_v) GaAs ОУ (рис. 3а) показывает, что на частоте 1 Гц усиление достигает уровня $K_v \approx 105$ дБ.

На рис. 3б показана ЛАЧХ коэффициента усиления по напряжению разработанного ОУ в схеме с глубокой отрицательной обратной связью (ООС).

Из приведенного графика видно, что при замкнутой отрицательной обратной связи верхняя граничная частота принимает значение $f_{\text{в}} \approx 463$ кГц.

Ниже представлены примеры практического применения разработанного GaAs ОУ в различных схемах включения. На рис. 4 показана схема неинвертирующего усилителя на базе GaAs ОУ.

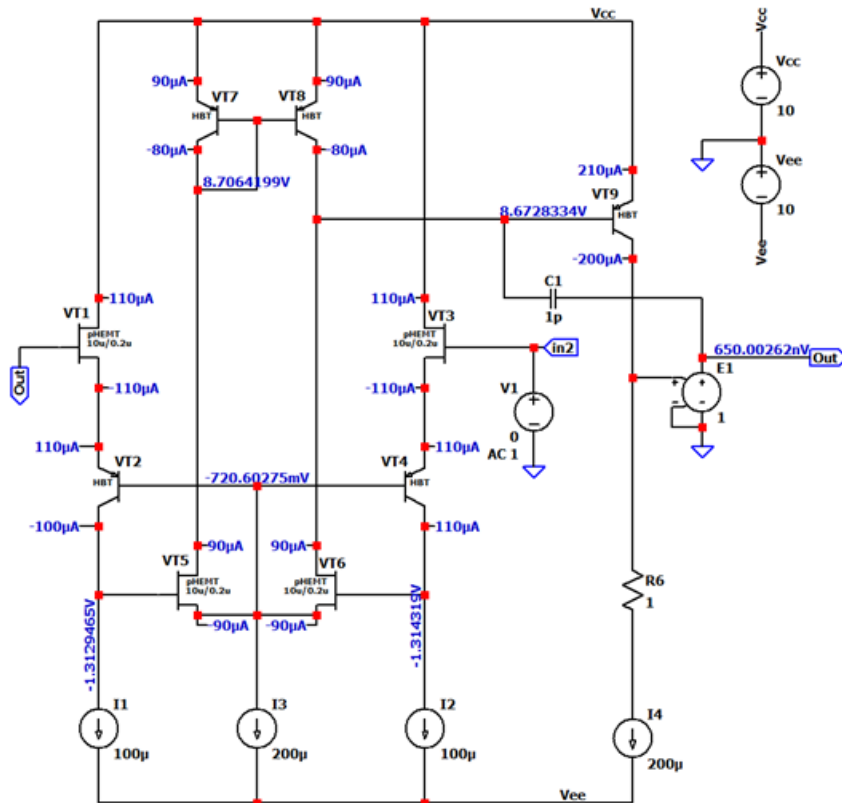


Рис. 2. Статический режим транзисторов GaAs операционного усилителя на рис. 1

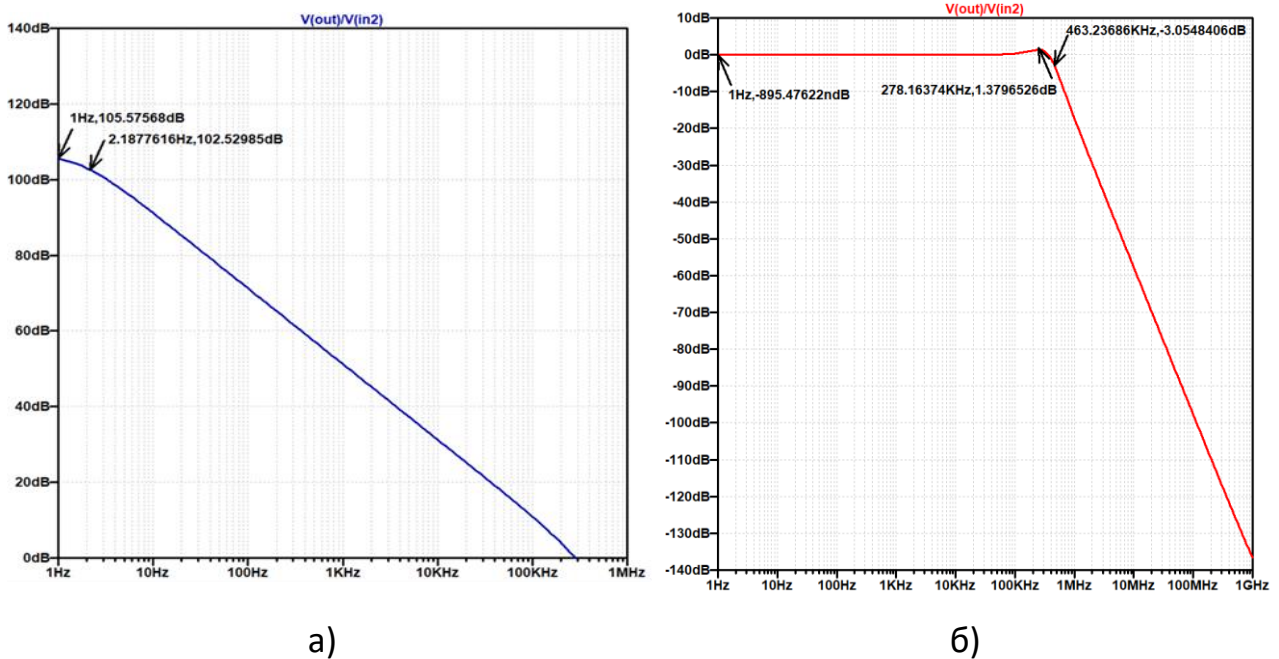


Рис. 3. ЛАЧХ коэффициента усиления по напряжению ОУ без ООС (а) и с глубокой ООС (б)

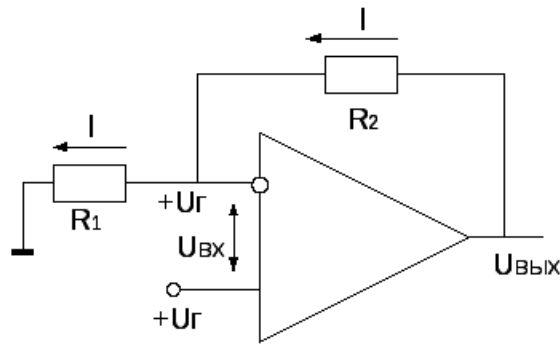


Рис. 4. Схема неинвертирующего усилителя на GaAs ОУ

На рис. 5 представлены результаты моделирования неинвертирующей схемы включения GaAs ОУ в среде LTspice, а также ЛАЧХ коэффициента усиления по напряжению при $R_1=1\text{кОм}$, $R_2=10\text{кОм}$.

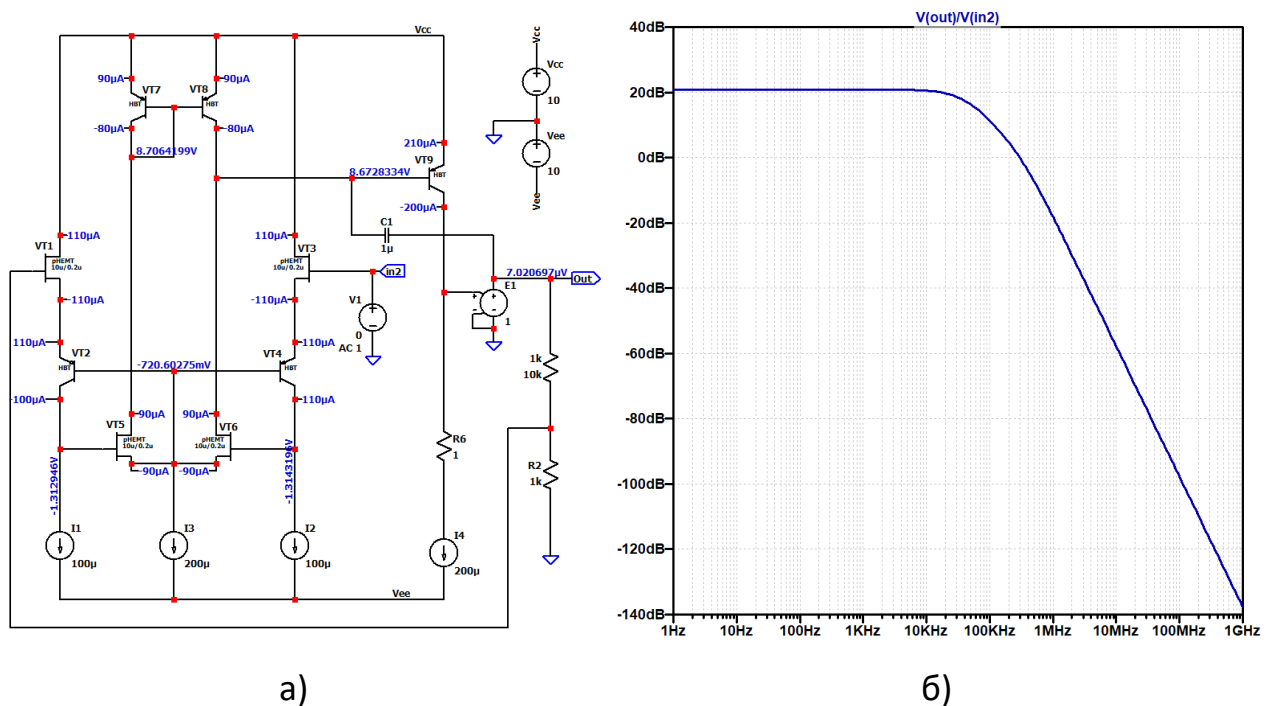


Рис. 5. Неинвертирующий усилитель (а), ЛАЧХ коэффициента усиления по напряжению (б)

Результаты моделирования свидетельствуют о том, что при использовании резисторов с номиналами $R_2=10\text{ кОм}$ и $R_1=1\text{ кОм}$ коэффициент усиления равен $K_y=20,8\text{ дБ}$. Это соответствует расчетным значениям, определяемым по формулам для коэффициента усиления K_y неинвертирующего усилителя:

$$K_y = 1 + \frac{R_2}{R_1}. \quad (1)$$

При этом систематическая составляющая напряжения смещения нуля в такой схеме включения составляет $U_{см} \approx 7$ мкВ, что удовлетворяет многим применениям.

Второй пример применения разработанного ОУ в устройствах автоматики и вычислительной техники представлен на рис. 6, где изображена схема инвертирующего сумматора нескольких входных напряжений.

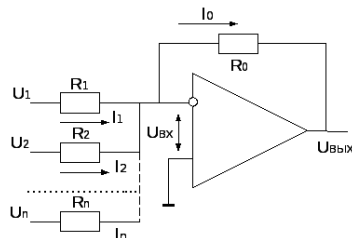


Рис. 6. Инвертирующий сумматор входных напряжений на GaAs ОУ

На рис. 7 приведена схема включения предлагаемого GaAs ОУ в соответствии с функциональной схемой.

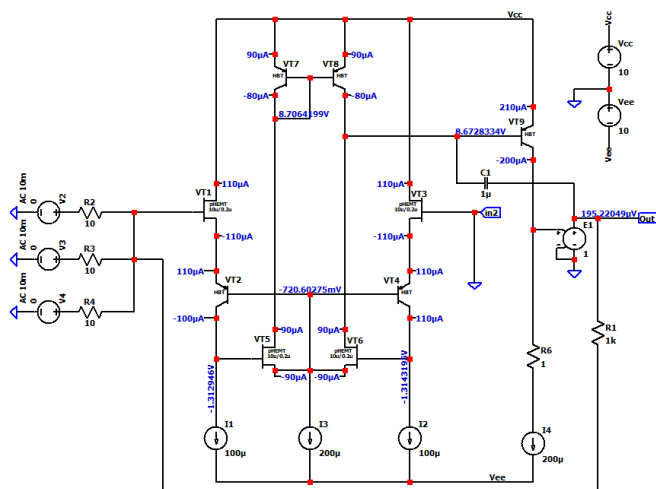


Рис. 7. Инвертирующий сумматор нескольких входных напряжений на основе GaAs ОУ

При этом выходное напряжение инвертирующего сумматора рис. 7 определяется формулой

$$U_{вых} = -\frac{R_0}{R} (U_1 + U_2 + \dots + U_n). \quad (2)$$

где U_1, U_2, U_n – входные напряжения,

R_0 – сопротивление в цепи отрицательной обратной связи,

$R=R_1=R_2=R_n$ – сопротивления входных резисторов.

При этом систематическая составляющая напряжения смещения нуля в данной схеме включения достигает значения $U_{cm} \approx 120$ мкВ.

ВЫВОДЫ

Представленное в данной статье исследование показывает предельные возможности разработанного GaAs ОУ. В рамках анализа двух различных схем включения ОУ было установлено, что систематическая составляющая напряжения смещения нуля лежит в диапазоне сотен микровольт при малом энергопотреблении входной подсхемы.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-10023, <https://rscf.ru/project/23-79-10023/>.

Список источников

1. Особенности проектирования зарядочувствительных усилителей на арсенид-галлиевом базовом кристалле / О. В Дворников [и др.]. DOI : <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-5-57-64> // Доклады БГУИР. 2022. № 20 (5). С. 57–64.
2. 120 GHz Microstrip Power Amplifier MMICs in a Commercial GaAs Process / S.Mahon et al. DOI: 10.1017/S1759078723001216 // International Journal of Microwave and Wireless Technologies. 2023. Vol. 16. P. 1–8.
3. 150 GHz GaAs Amplifiers in a Commercial 0.1- μ m GaAs PHEMT Process / A. Bessemoulin et al. DOI: 10.1109/EuMIC.2016.7777493 // 11th European Microwave Integrated Circuits Conference (EuMIC). 2016. P. 552–555.
4. Design of a Broadband High Flatness Drive Amplifier Based on GaAs Process / J. J. Huang et al. DOI: 10.1109/ICICM59499.2023.10365898 // 8th International Conference on Integrated Circuits and Microsystems (ICICM'23). 2023. P. 306–310.
5. Kim M. S., Jhon H. A. Broadband Gain Amplifier Designed with the Models for Package and Diode Using 0.5 μ m GaAs E-PHEMT Process. DOI: 10.3390/electronics10212678 // Electronics. 2021. Vol. 10, Iss. 21. Art. No. 2678.
6. Kleimenkin D., Chumakov V., Pakhomov I. Gallium-Arsenide Operational Amplifier Without High-Temperature Integrated Resistors. DOI: 10.1109/

ElCon61730.2024.10468421 // Conference of Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElCon). 2024. P. 544–547.

7. Gallium-Arsenide JFET Op-Amp with High Open-Loop Gain / N. Prokopenko et al. DOI: 10.1109/TELFOR52709.2021.9653228 // 29th Telecommunications Forum (TELFOR). 2021. P. 1–4.

8. The output stage of an operational amplifier on GaAs n-channel field-effect and GaAs p-n-p bipolar transistors with nonlinear negative feedback / A. Zhuk et al. DOI: 10.36227/techrxiv.17241191.v1 // Techrxiv. Posted date: 21.12.2021.

9. JFET (Si, SiC, GaAs) Compensating Voltage Regulators for the Operation with Sensor Interfaces of Physical Quantities at Low Temperatures / N. Prokopenko et al. DOI: 10.1109/EExPolytech50912.2020.9243975 // IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech). St. Petersburg, Russia, 2020. P. 59–62.

10. Влияние проникающей радиации на параметры аналоговых компонентов базового матричного кристалла МН2ХА030 / О. В Дворников [и др.]. DOI : <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-4-52-60> // Доклады БГУИР. 2021. № 19 (4). С. 52–60.

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВРЕМЕНИ ЗАВЕРШЕНИЯ
БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ С ПОМОЩЬЮ
РЕКУРРЕНТНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ
И ВНИМАНИЯ НА ОСНОВЕ СОБЫТИЙНЫХ МЕТОК**

ПРОКОПЕНКО Антон Сергеевич, магистрант
Поволжский государственный университет сервиса
445017, Россия, Тольятти, vip.ar15@mail.ru

САМОХИНА Наталья Станиславовна, кандидат технических наук,
доцент высшей школы передовых производственных технологий
Поволжский государственный университет сервиса
445017, Россия, Тольятти, Skipert-99@ya.ru

Аннотация. В работе предлагается гибридная модель на основе рекуррентных нейронных сетей с механизмом внимания для автоматизированного прогнозирования оставшегося времени выполнения бизнес-процессов по событийным логам. Модель интегрирует временные эмбединги, контекстные признаки и многоголовое внимание, что позволяет эффективно выявлять значимые исторические события даже на ранних этапах длинных последовательностей. Экспериментальная оценка проведена на двух реальных датасетах: из банковской сферы и здравоохранения. Результаты показали снижение средней абсолютной ошибки на 18,3 % по сравнению с классической LSTM и на 41,2 % относительно моделей на основе процессного майнинга.

Ключевые слова: прогнозирование бизнес-процессов, машинное обучение, рекуррентные нейронные сети, механизм внимания, процессный майнинг, анализ событийных логов, оставшееся время, цифровой двойник процесса.

**BUSINESS PROCESS COMPLETION TIME FORECASTING USING
RECURRENT NEURAL NETWORKS AND EVENT-BASED ATTENTION**

PROKOPENKO Anton Sergeevich, Master's student
Volga Region State University of Service
445017, Russia, Togliatti, vip.ar15@mail.ru

SAMOKHINA Natalia Stanislavovna, Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor at the Higher School of Advanced Manufacturing Technologies

Abstract. This paper proposes a hybrid model based on recurrent neural networks with an attention mechanism for automated prediction of the remaining execution time of business processes using event logs. The model integrates temporal embeddings, contextual features, and multi-head attention, enabling it to effectively identify significant historical events even at early stages of long sequences. Experimental evaluation was conducted on two real-world datasets from the banking and healthcare sectors. The results show a reduction in mean absolute error by 18,3 % compared to a classical LSTM model and by 41,2 % relative to process mining-based approaches.

Keywords: business process prediction, machine learning, recurrent neural networks, attention mechanism, process mining, event log analysis, remaining time prediction, process digital twin.

ВВЕДЕНИЕ

Современные предприятия все чаще сталкиваются с необходимостью повышения операционной эффективности за счет точного управления временными характеристиками бизнес-процессов. В условиях растущей конкуренции и ужесточения требований клиентов, например, соблюдение SLA, минимизация сроков обработки заявок, прогнозирование времени завершения процессов становится критически важной задачей. Неточность таких прогнозов приводит к нарушению договоренностей с заказчиками, перерасходу ресурсов и снижению репутации компании. Например, в логистике задержки в обработке грузовых операций увеличивают издержки на 15–20 % (по данным McKinsey, 2023), а в здравоохранении – замедляют оказание экстренной помощи. Однако традиционные методы прогнозирования, основанные на статистических моделях или правилах, например, среднее время выполнения этапа, игнорируют сложную динамику процессов: параллельные ветвления, контекстные зависимости (загрузка сотрудников, сезонность) и нелинейные паттерны в данных. Это делает их недостаточно точными для применения в реальных условиях, где процессы часто адаптируются «на лету».

Актуальность исследования усиливается массовым накоплением событийных меток в системах управления бизнес-процессами (BPM), ERP и CRM. Эти данные содержат детальную информацию о последовательности операций, их исполнителях и временных метках, что открывает возможности для применения методов машинного обучения. Однако существующие подходы, такие как регрессионные модели или простые рекуррентные сети (RNN), не учитывают иерархическую структуру процессов и долгосрочные зависимости между этапами. Например, в сложных сценариях (страхование, кредитование) процесс может включать десятки условных переходов, где ключевое влияние на финальное время оказывают не последние, а промежуточные этапы (например, согласование документов). Здесь классические RNN теряют контекст из-за проблемы затухающего градиента, а методы процессного майнинга, например, алгоритмы дискавери не обеспечивают предиктивной аналитики.

Предлагаемое исследование направлено на преодоление этих ограничений за счет интеграции рекуррентных нейронных сетей с механизмами внимания. Такой гибридный подход позволяет модели:

- обрабатывать последовательности произвольной длины с учетом временных интервалов между событиями;
- выделять релевантные этапы процесса, даже если они отделены десятками шагов (влияние первичного согласования на финальное утверждение);
- интегрировать внешние факторы (загрузка системы, опыт сотрудника) через контекстное встраивание.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для объективной оценки эффективности предложенной модели прогнозирования времени завершения бизнес-процессов были выбраны два датасета из разных предметных областей: банковской сферы и здравоохранения. Датасет по кредитованию включает 15 243 процесса с детализированными событийными метками, включая действия сотрудников, проверки, согласования, средняя длина последовательности 47 событий. Медицинский датасет содержит 8 412 процессов экстренных обращений пациентов, включающих этапы приема, диагностики,

госпитализации и выписки. Оба набора данных содержат временные метки с точностью до минуты, что позволяет проводить высокоточный анализ. Для оценки качества моделей использовались стандартные регрессионные метрики: средняя абсолютная ошибка (MAE) и корень из среднеквадратичной ошибки (RMSE), выраженные в часах. Сравнение проводилось с тремя базовыми моделями: классической LSTM, моделью на основе процессного майнинга (Alpha Miner, линейная регрессия) и графовой нейронной сетью (GNN). Все модели обучались на 70 % данных, валидировались на 15 %, тестировались на оставшихся 15 %. Гиперпараметры оптимизировались с помощью байесовской оптимизации для минимизации MAE на валидационной выборке.



Рис. 1. Модели прогнозирования

На диаграмме (рис. 1) представлены значения средней абсолютной ошибки (MAE, в часах) для четырех моделей: предложенной гибридной архитектуры RNN с механизмом внимания, классической LSTM, модели на основе процессного майнинга (Alpha Miner + линейная регрессия) и графовой нейронной сети (GNN). Оценка выполнена на двух реальных наборах данных: обработка кредитных заявок (банковский сектор) и маршрутизация экстренных обращений пациентов (здравоохранение). График демонстрирует, что предложенная модель до-

стигает наименьшей ошибки в обеих предметных областях (1,82 ч и 0,75 ч соответственно), что подтверждает ее эффективность в условиях сложной и вариативной динамики бизнес-процессов. Наибольшее преимущество наблюдается в банковском секторе, где длинные последовательности и условные ветвления усиливают важность механизма внимания для выявления долгосрочных зависимостей.

Полученные результаты свидетельствуют о превосходстве предложенной гибридной архитектуры RNN с механизмом внимания над всеми сравниваемыми моделями. Как показано в табл. 1, на банковском датасете предложенная модель достигла MAE = 1,82 часа, что на 18,3 % ниже, чем у классической LSTM (2,23 ч.), и значительно лучше, чем у GNN (2,01 ч) и модели на основе Alpha Miner (3,15 ч.). В медицинской области преимущество также выражено четко: MAE составил 0,75 часа против 0,92 часов у LSTM. Это указывает на то, что механизм внимания эффективно выявляет значимые паттерны в длинных и сложных последовательностях, которые традиционные рекуррентные сети не способны удерживать в памяти. Особенно важно, что улучшение достигается именно в условиях высокой вариативности процессов, когда возможны множественные ветвления и повторяющиеся действия. Таким образом, модель демонстрирует не только статистическое превосходство, но и более высокую адаптивность к реальным условиям работы бизнес-процессов.

Таблица 1

Сравнение моделей прогнозирования времени завершения бизнес-процессов по средней абсолютной ошибке (MAE)

Модель	MAE, ч. (банковский сектор)	MAE, ч. (здравоохранение)	Улучшение по MAE относительно LSTM, %
Предложенная модель (RNN + Attention)	1,82	0,75	+18,3%
LSTM	2,23	0,92	-
Alpha Miner + линейная регрессия	3,15	1,41	-41,2%
Графовая нейронная сеть	2,01	0,87	-8,5%

MAE – средняя абсолютная ошибка (в часах). Улучшение рассчитано как относительное снижение ошибки по сравнению с LSTM (1).

$$\frac{(MAE_{LSTM} - MAE_{предл.})}{MAE_{LSTM}} \times 100\% \quad (1)$$

Чтобы понять вклад отдельных компонентов в общую производительность модели, было проведено исследование абляции, экспериментальное исключение ключевых элементов архитектуры. Результаты, представленные в табл. 2, показывают, что наибольший вклад вносит временное эмбединг: его удаление увеличивает MAE на 13,7 %. Это подтверждает важность явного учета продолжительности интервалов между событиями, поскольку в бизнес-процессах разница между «быстрой» и «замедленной» ветвью часто зависит от длительности простоев. Удаление контекстного встраивания внешних факторов, например, загрузки отдела или времени суток, привело к росту ошибки на 7,1 %, что указывает на ценность интеграции дополнительной информации за пределами событийного потока. Также было установлено, что переход от многоголового внимания к одnogоловому снижает точность на 4,9 %, что говорит о необходимости параллельного анализа различных типов зависимостей, например, временных, организационных, логических. Эти результаты подтверждают, что все компоненты модели взаимодополняют друг друга и необходимы для достижения максимальной эффективности.

MAE – средняя абсолютная ошибка; Δ MAE рассчитана относительно полной модели (2).

$$\frac{(MAE_{частичная} - MAE_{полная.})}{MAE_{полная}} \times 100\%. \quad (2)$$

Внешние факторы включают: загрузку подразделения, время суток, опыт исполнителя.

Одним из ключевых преимуществ предложенного подхода является возможность интерпретации решений модели через визуализацию весов внимания. На рис. 2 представлена тепловая карта, отражающая распределение весов внимания по шагам процесса обработки кредитной заявки. По горизонтали отложены события (от 1 до 50), по вертикали – четыре головы внимания. Яркость цвета соответствует степени влияния конкретного события на прогноз оставшегося

времени. Наблюдается, что Head 1 активируется на ранних этапах (шаги 5–7), связанных с проверкой документов, тогда как Head 3 фокусируется на более поздних действиях (шаги 30–35), таких как «Согласование с риск-менеджером». Это означает, что модель автоматически выделяет не только текущее состояние, но и исторически значимые точки, которые могут создавать задержки. Такая интерпретируемость особенно ценна для бизнес-аналитиков и владельцев процессов, так как позволяет не только прогнозировать, но и объяснять причины прогноза, что повышает доверие к системе автоматического анализа.

Таблица 2

Результаты изучения абляций

Конфигурация модели	MAE, ч (банковский сектор)	Увеличение ошибки (Δ MAE), %	Основной эффект исключения компонента
Полная модель (RNN + Attention + временные и контекстные признаки)	1,82	-	Базовый уровень
Без временного эмбединга	2,07	+13,7%	Потеря информации о длительности интервалов между событиями
Без контекстного встраивания внешних факторов	1,95	+7,1%	Игнорирование нагрузки, времени суток, роли исполнителя
Одноголовое внимание	1,91	+4,9%	Снижение способности параллельного анализа различных типов зависимостей

Это свидетельствует о способности модели автоматически выявлять и взвешивать значимые исторические события, даже удаленные от текущего состояния. Представленная интерпретируемость позволяет аналитикам понимать логику прогноза, что повышает доверие к системе и открывает возможности для целенаправленной оптимизации бизнес-процессов.

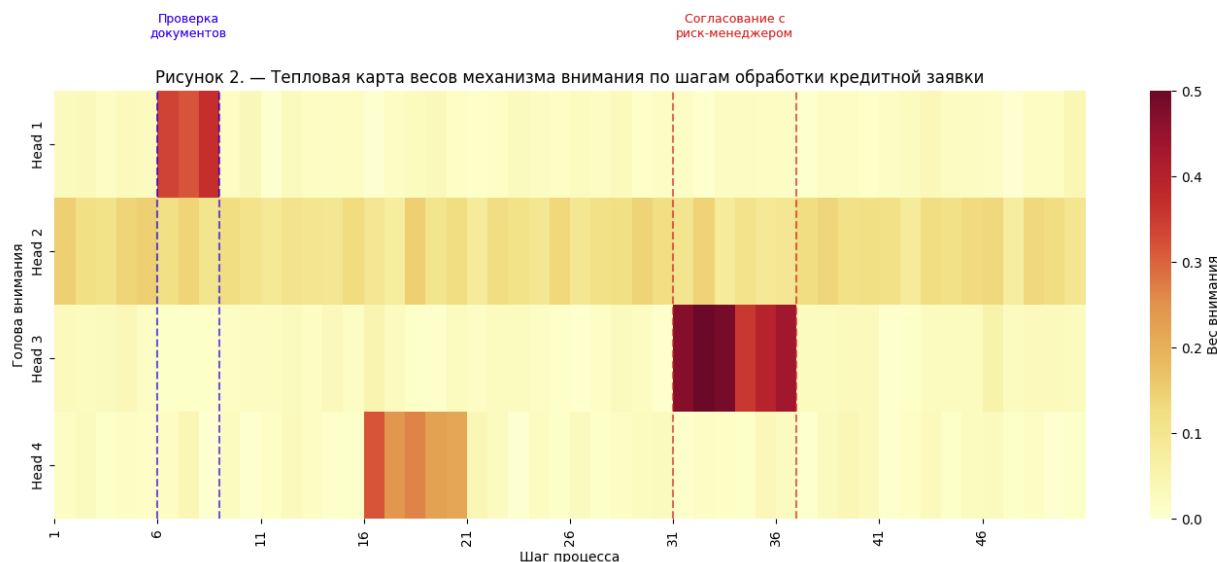


Рис. 2. Тепловая карта весов механизма внимания по шагам обработки кредитной заявки

ВЫВОДЫ

В совокупности полученные данные демонстрируют, что интеграция механизма внимания в архитектуру рекуррентной нейронной сети существенно повышает точность и интерпретируемость прогнозирования времени завершения бизнес-процессов. Модель успешно справляется с длинными последовательностями, учитывает как внутреннюю динамику процесса, так и внешние факторы, обеспечивая статистически значимое улучшение по сравнению с современными аналогами. Представленные таблицы и рисунки наглядно подтверждают как техническое, так и практическое значение разработанного подхода. Полученные результаты вносят вклад в развитие области интеллектуального анализа процессов и открывают перспективы для создания адаптивных, самообучающихся систем управления бизнес-процессами следующего поколения.

Список источников

1. Wil M. P. van der Aalst. Process Mining: Discovery, Conformance and Enhancement of Business Processes. Berlin: Springer, 2011.
3. Самохина Н. С., Прокопенко А. С. Математические и алгоритмические основы разработки серверной части платформы для анализа и оптимизации биз-

нес-процессов. EDN VKKUBR // Информационные технологии. Радиоэлектроника. Телекоммуникации (ITRT-2024) : Материалы XI Международной заочной научно-технической конференции, Тольятти, 29 ноября 2024 года. Тольятти : ПВГУС, 2025. С. 514–517.

4. Самохина Н. С., Прокопенко А. С. Разработка виртуальной машины для генерации программного кода. EDN NHTTWI // Информационно-технологический вестник. 2025. № 3 (45). С. 13–24.

5. Интерференция волн в невзаимных средах / А. Г. Глущенко [и др.] // В мире научных открытий. 2012. № 1–1 (25). С. 98–112.

6. Глущенко А. Г., Глущенко Е. П., Устинова Е. С. Особенности эффекта Доплера в многомодовом волноводе // Компьютерная оптика. 2017. Т. 41. № 5. С. 687–693.

**АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ СПОСОБОВ ВРЕДНОСНОГО
ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННЫЕ
БЛОКЧЕЙН-СИСТЕМЫ**

САВИНОВ Андрей Александрович, аспирант
*Поволжский государственный университет
телекоммуникаций и информатики
443124, Россия, Самара, mr.andrew111@yandex.ru*

СОЛОДОВ Александр Геннадьевич, кандидат технических наук,
доцент кафедры информатики и вычислительной техники
*Поволжский государственный университет
телекоммуникаций и информатики
443105, Россия, Самара, sag_samara@mail.ru*

Аннотация. В работе рассматриваются современные способы вредоносного воздействия на децентрализованные системы, основанные на технологии блокчейн. Проведен анализ поверхности атак, формирующихся на нескольких уровнях, включая механизмы консенсуса, сетевую инфраструктуру, смарт-контракты и экономические механизмы распределённых протоколов. На основе исследований и практических инцидентов проводится анализ ключевых классов угроз и их последствий. Работа исследует необходимость комплексного подхода к моделированию угроз и формированию отказоустойчивых распределённых систем.

Ключевые слова: блокчейн, децентрализованные системы, атаки на консенсус, сетевые атаки, смарт-контракты, DeFi, MEV, безопасность распределённых систем.

**ANALYSIS OF MODERN METHODS OF MALICIOUS INFLUENCE
ON DECENTRALIZED BLOCKCHAIN SYSTEMS**

SAVINOV Andrey Aleksandrovich, PhD student
*Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics
443124, Russia, Samara, mr.andrew111@yandex.ru*

SOLODOV Aleksandr Gennadievich, Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor at Department of informatics and computer engineering

Abstract. This work examines contemporary methods of malicious influence on decentralized systems based on blockchain technology. An analysis is conducted of the attack surface formed across multiple layers, including consensus mechanisms, network infrastructure, smart-contract logic, and the economic mechanisms of distributed protocols. Drawing on existing research and practical incidents, the study analyzes key classes of threats and their consequences. The paper explores the necessity of an integrated approach to threat modeling and the development of fault-tolerant distributed systems.

Keywords: blockchain, decentralized systems, consensus attacks, network attacks, smart contracts, DeFi, MEV, distributed systems security.

ВВЕДЕНИЕ

Рост и развитие децентрализованных систем с использованием технологии блокчейн сопровождается ростом их экономической и социальной значимости, что в свою очередь вызывает рост интереса к ним со стороны злоумышленников, стремящихся использовать уязвимости в архитектуре, логике и сетевой организации таких систем. Несмотря на формальные криптографические гарантии целостности и неизменяемости данных, безопасность блокчейна определяется не только отказоустойчивостью используемых алгоритмов, но и свойствами распределенной инфраструктуры, а также экономическими стимулами участников. При систематическом обзоре поверхности атак на блокчейн-системы можно сделать вывод, что угрозы формируются на пересечении криптографических механизмов, сетевой архитектуры и прикладного уровня.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Одним из главных направлений вредоносных воздействий выступают угрозы, связанные с нарушением протоколов консенсуса. Атаки данного класса могут иметь как исключительно технические, так и экономические предпосылки. Одним из наиболее известных примеров является классическая атака «51 %», при которой субъект, контролирующий большую часть вычислительной мощности,

получает возможность переписывать цепочку, проводить двойные траты и блокировать транзакции. Практическая реализация таких атак неоднократно наблюдалась в публичных сетях. В частности, сеть «Ethereum Classic» в 2019 и 2020 годах подвергалась реорганизациям цепочки, приводившим к ущербу для провайдеров и бирж. При этом статистические данные показывают, что даже без достижения абсолютного доминирования майнинг-пулы могут использовать стратегии «selfish mining», задерживая публикацию блоков для увеличения собственной доли вознаграждений и нарушения равновесия в распределении «hash rate». Такие аномальные модели поведения зафиксированы в реальных сетях, включая «Monacoін», «Bitcoin Cash» и «Ethereum», что указывает на необходимость анализа не только внешних атак, но и стратегических отклонений внутри протоколов [1].

Еще одним фундаментальным направлением угроз являются сетевые воздействия, затрагивающие пиринговую структуру блокчейна. Базовая архитектура P2P-сетей, на которых строится распространение блоков и транзакций, характеризуется отсутствием централизованного контроля, что делает ее уязвимой к атакам, направленным на нарушение связности и маршрутизации. На данный момент можно выделить ряд сценариев, включающих атаки на DNS-инфраструктуру, манипуляции с маршрутизацией, искусственное задерживание сообщений и подмену пиров. При подмене пира злоумышленник выдает себя за легитимного участника пиринговой сети, чтобы перехватывать, подменять или блокировать передаваемые данные, что может повлечь за собой нарушение целостности или утечку данных и срыв консенсуса [2]. Сетевые же атаки могут приводить к изоляции узлов, дезорганизации процесса распространения блоков и увеличению вероятности расхождений цепочек. Наблюдения показывают, что даже относительно кратковременная изоляция группы узлов может инициировать конкурентные ветви цепи, что создает условия для проведения атак на финальность или двойные траты, то есть использование одних и тех же ресурсов в двух и более транзакциях одновременно. В дополнение к изоляции узлов, атаки типа «DDoS» способны существенно замедлять принятие блоков, нарушать параметры сложности и тем самым влиять на стабильность всей сети. Это подчеркивает, что

устойчивость блокчейна определяется не только консенсусом, но и общей надежностью коммуникационной инфраструктуры.

Важной областью угроз также являются уязвимости прикладного уровня, в первую очередь связанные со смарт-контрактами и протоколами децентрализованных финансов. Смарт-контракты, несмотря на их автоматизированный и детерминированный характер, сталкиваются с рядом логических уязвимостей, способных привести к масштабным финансовым потерям. Примером, имеющим значительный резонанс, выступает взлом «Poly Network», в ходе которого злоумышленники использовали несогласованность логики межсетевого взаимодействия смарт-контрактов, что позволило вывести активы на значительную сумму. Подобные инциденты свидетельствуют о том, что отсутствие централизованного контроля и необратимость транзакций усиливают последствия любых ошибок в бизнес-логике. Кроме того, смарт-контракты подвержены атакам повторного входа, недостаткам управления правами доступа и ошибкам в механизмах обновления, что превращает их в один из наиболее уязвимых компонентов децентрализованных систем.

ВЫВОДЫ

Таким образом, поверхность атак блокчейн-систем характеризуется многоуровневой структурой и требует интегрированного научного анализа, объединяющего криптографию, сетевую инженерию и экономическую теорию. Систематический обзор подчеркивает необходимость комплексного подхода к моделированию угроз, при котором математические модели консенсуса, анализ P2P-топологий и формальная верификация смарт-контрактов рассматриваются в единой аналитической рамке. Важным направлением дальнейших исследований остается разработка методов формализации экономической устойчивости блокчейнов к рациональному поведению участников, а также создание инструментов для масштабируемого анализа логики протоколов «DeFi». Дополнительного внимания требуют вопросы оценки системного риска, возникающего при концентрации MEV-инфраструктуры, и влияние сетевых атак на гарантию финальности. Усиление методологической базы в этих направлениях позволит повысить надежность децентрализованных систем и обеспечить устойчивость к широкому

спектру современных угроз.

Список источников

1. Нарезный С. В., Мищенко А. С. Децентрализованные сети и механизмы консенсуса: теоретические основы и уязвимости. Санкт-Петербург : .БХВ-Петербург, 2019. 288 с.

2. Савинов, А. А., Солодов, А. Г. Исследование методов обеспечения неизменяемости данных в защищенных системах // XVIII Ежегодная научная сессия аспирантов и молодых ученых : материалы Всероссийской научной конференции (с международным участием), Вологда, 25–29 ноября 2024 года. Вологда, 2025. С. 606-608

3. Савинов А. А., Солодов А. Г. Передача данных по беспроводным сетям в условиях переизбытка устройств // Проблемы и перспективы внедрения инновационных телекоммуникационных технологий : сборник материалов IX Международной научно - практической очно - заочной конференции. Оренбург, 2023. С. 284-290.

АНАЛИТИЧЕСКОЕ И ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИГНАЛОВ СТАНДАРТА DVB-S2X В КАНАЛЕ СВЯЗИ С АБГШ И ВЗАИМНЫМИ ПОМЕХАМИ

САВИЩЕНКО Николай Васильевич, доктор технических наук,
профессор, профессор кафедры общепрофессиональных дисциплин
*Военная орденов Жукова и Ленина Краснознаменная академия связи
имени Маршала Советского Союза С. М. Буденного
194064, Россия, Санкт-Петербург, snikaspb@mail.ru*

ПЕЛИН Артем Александрович, адъюнкт
кафедры общепрофессиональных дисциплин
*Военная орденов Жукова и Ленина Краснознаменная академия связи
имени Маршала Советского Союза С. М. Буденного
194064, Россия, Санкт-Петербург, PelinVUC@yandex.ru*

Аннотация. В данной статье рассматриваются вопросы повышения спектральной эффективности спутниковых систем связи стандарта DVB-S2X. Приведено аналитическое описание вероятности ошибки для сигналов АФМ-16 и многоуровневых конструкций. Разработана имитационная модель в среде Simulink, позволяющая исследовать влияние взаимных помех на качество приема.

Ключевые слова: спутниковая связь, DVB-S2X, АФМ, вероятность ошибки, Simulink, отношение сигнал/шум.

ADVANCED ANALYTICAL AND SIMULATION MODELING OF DVB-S2X STANDARD SIGNALS IN A COMMUNICATION CHANNEL WITH AWGN AND MUTUAL INTERFERENCE

SAVISHCHENKO Nikolai Vasilievich, Doctor of Engineering Sciences,
Professor, Professor at the Department of General Professional Disciplines
*Military Order of Zhukov and Lenin Red Banner Academy of Communications named
after Marshal of the Soviet Union S. M. Budyonny
194064, Russia, St. Petersburg, snikaspb@mail.ru*

PELIN Artem Aleksandrovich, Adjunct
at the Department of General Professional Disciplines

Abstract. This article discusses the issues of increasing the spectral efficiency of satellite communication systems of the DVB-S2X standard. An analytical description of the probability of error for AFH-16 signals and multilevel structures is given. A simulation model has been developed in the Simulink environment, which allows to investigate the effect of mutual interference on the reception quality.

Keywords: satellite communication, DVB-S2X, AFM, error probability, Simulink, signal-to-noise ratio.

ВВЕДЕНИЕ

Современный этап развития инфокоммуникационных систем характеризуется существенным ростом объемов передаваемой информации. Внедрение форматов сверхвысокой четкости (UHDTV – Ultra High Definition Television), необходимость обеспечения широкополосным доступом подвижных объектов (авиационный и морской транспорт), а также развитие интерактивных сервисов (VSAT – Very Small Aperture Terminal) выдвигают жесткие требования к пропускной способности каналов связи. В условиях ограниченности частотно-энергетического ресурса геостационарной орбиты и перегруженности Ku- и Ka-диапазонов, задача приближения спектральной эффективности систем передачи к теоретическому пределу Шеннона приобретает первостепенное значение.

Стандарт DVB-S2 (Digital Video Broadcasting-Satellite, Version 2), долгое время являвшийся базовым, исчерпал возможности существенного наращивания эффективности без глобальной модернизации физического уровня. Рассматриваемый в настоящей работе стандарт DVB-S2X (Extensions) представляет собой эволюционное развитие архитектуры DVB-S2, направленное на обеспечение работы в расширенном динамическом диапазоне отношений сигнал/шум (SNR – Signal-to-noise ratio) и минимизацию энергетических потерь за счет более оптимизированной сетки адаптивной модуляции и кодирования.

Основой повышения эффективности системы DVB-S2X является введение расширенного набора схем модуляции и кодирования. В отличие от предшествующих систем, предусматривается использование сигнальных созвездий вплоть до АФМ-256 (амплитудно-фазовая манипуляция), что целесообразно для высокоэнергетических профессиональных каналов связи и магистральных линий.

В части помехоустойчивого кодирования сохранена каскадная схема (внешний код (БЧХ – Боуза-Чоудхури-Хоквингема) и внутренний (LDPC – Low-Density-Parity-Check), однако расширена номенклатура кодовых скоростей и введены дополнительные длины кодовых блоков, что позволяет более гибко адаптировать параметры сигнала к текущему состоянию канала распространения радиоволн.

1. Сигналы АФМ – $M(M/2, M/2)$. Рассмотрим один из вариантов сигнальной конструкции, используемых в стандарте DVB-S2x, когда сигналы АФМ- M , расположены равномерно на двух концентрических окружностях так, что на каждой из окружностей будет $M/2$ сигналов. Причем каждая пара сигналов на соседних окружностях расположена на одном луче, исходящем из начала координат.

Предположим, что отношение амплитуд сигналов равно $g = \sqrt{E_{m,2}} / \sqrt{E_{m,1}} > 1$

. Максимальная и средняя энергии равны, соответственно, $E_m = g^2 E_{m,1}$ и $E_c = (g^2 + 1) E_{m,1} / 2$.

При геометрическом представлении сигнальных конструкций удобно оперировать также с радиусами соответствующих концентрических окружностей, на которых располагаются сигналы: $R_1 = \sqrt{E_{m,1}}$, $R_2 = \sqrt{E_{m,2}}$.

Формула вероятности символьной ошибки для сигнальной конструкции АФМ- $M(M/2, M/2)$, $M \geq 8$ имеет вид [1]

$$P_e(g_{bc}) = e^{-\sum_{k=1}^4 a_k T(b_k \sqrt{g_{bc} g_{bc} \log_2 M})} + \frac{1}{2} Q(u \sqrt{g_{bc} \log_2 M}), \quad (1)$$

где $T(z, a) = \frac{1}{2p} \int_0^a \frac{e^{-z^2/2(1+x^2)}}{1+x^2} dx$ – функция Оуэна и $Q(z) = 1/2 \operatorname{erfc}(z/\sqrt{2})$ – функция Гаусса, $\operatorname{erfc}(z)$ – дополнение к функции ошибки [1], $a = (2, 1, 1, 1)$, а также

$$b = \frac{1}{\sqrt{g^2 + 1}} \left(g - 1, 2 \sin \frac{2p}{M}, 2 \sin \frac{2p}{M}, 2g \sin \frac{2p}{M} \right)$$

$$c = \left(\frac{g+1}{g-1} \operatorname{tg} \frac{2p}{M}, g \operatorname{csc} \frac{4p}{M} - \operatorname{ctg} \frac{4p}{M}, \operatorname{ctg} \frac{2p}{M}, \operatorname{ctg} \frac{4p}{M} - \frac{1}{g} \operatorname{csc} \frac{4p}{M} \right)$$

$$u = 2 \sin \frac{2p}{M} \frac{g}{\sqrt{g^2 + 1}},$$

В стандарте DVB-S2X для сигналов АФМ-16(8,8) отношение радиусов $g = 2,19$ [2].

Выражение (1) для вероятности ошибки, рассматриваемое относительно переменной $g > 1$, при фиксированном значении отношения SNR g_{bc}^* позволяет сформулировать оптимизационную задачу:

$$\min_{g \in W} P_e(g, g_{bc}^*), \text{ где } W = \{g | g > 1\}.$$

Определим оптимальное значение $g_{\text{opt}}(M)$ исходя из принципа плотнейшей упаковки сигнальных точек [3]. На первом уровне минимальное евклидово расстояние может быть найдено как $d_e = 2\sqrt{E_{m,1}} \sin \frac{2p}{M}$. Радиус второго уровня будет находиться из условия $\sqrt{E_{m,2}} - \sqrt{E_{m,1}} = d_e$.

Отсюда следует, что $g_{\text{opt}}(M) = 1 + 2 \sin \frac{2p}{M}$. В частности, $g_{\text{opt}}(8) = 1 + \sqrt{2} = 2,414$,

$$g_{\text{opt}}(16) = 1 + \sqrt{2 - \sqrt{2}} = 1,765, \quad g_{\text{opt}}(32) = 1 + \sqrt{2 - \sqrt{2 + \sqrt{2}}} = 1,390.$$

Пусть $\mathcal{G}_{\text{opt}} = \mathcal{G}_{\text{opt}}(M, g_{bc}^*) = \arg \min_{g \in W} P_e(g, g_{bc}^*)$. Численные расчеты оптимального значения $\mathcal{G}_{\text{opt}} = \mathcal{G}_{\text{opt}}(M, g_{bc}^*)$ при $M = 16$ приведены в табл. 1. Анализ численных результатов, полученных в MATHEMATICA с помощью функции Minimize и представленных в табл. 1 и рис. 1, показывает, что при малых отношениях SNR $g_{bc}^* = 10$ дБ $\mathcal{G}_{\text{opt}}$ отличается от $g_{\text{opt}}(16) = 1 + \sqrt{2 - \sqrt{2}} = 1,765367$. При больших отношениях SNR $g_{bc}^* \gg 10$ дБ получаем $\mathcal{G}_{\text{opt}} \approx g_{\text{opt}}$ (рис. 1).

Оптимальное значение $\mathcal{G}_{\text{opt}} = \mathcal{G}_{\text{opt}}(M, g_{bc}^*)$ при $M = 16$

g_{bc}^* [dB]	10	12	15	18	21	24	27	41	45
$\mathcal{G}_{\text{opt}}$	3,645	2,741	2,244	2,008	1,887	1,826	1,796	1,766 59	1,765 85

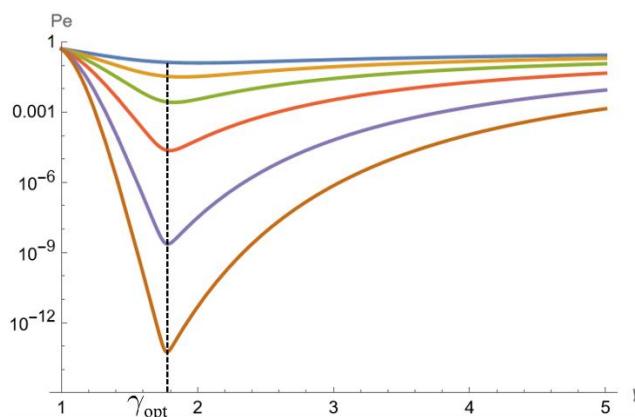


Рис. 1. График символьной вероятности P_e для АФМ-16(8,8) в зависимости от $g = 18, 21, 24, 27, 30, 32$

Аналогичные результаты получаются также при $M = 8$ и $M = 32$. Это хорошо согласуется с формулировкой задачи синтеза сигналов, представленной в [3]. При малых отношениях сигнал/шум – это задача квантования, при больших – задача плотнейшей упаковки сигнальных точек.

2. Сигналы АФМ- $M(M/n, M/n, j, M/n)$. Рассмотрим обобщение сигналов АФМ- $M(M/2, M/2)$, приведенных выше. Верное расположение сигнальных точек можно обобщить на сигнальную конструкцию с n -уровнями. Обозначим такую сигнальную конструкцию как АФМ- $M(M/n, M/n, j, M/n)$ или АФМ- $M((M/n) \times n)$, где $M/n \geq 3$ – целое число, $n \geq 2$. Пусть $g_k = R_{k+1}/R_1 = \sqrt{E_{m,k+1}}/\sqrt{E_{m,1}}$, $g_0 = 1$, $g_0 = g_1$, $k = 0, \dots, n-1$.

Очевидно, что для данной сигнальной конструкции максимальная энергия определяется как $E_m = g_{n-1}^2 E_{m,1}$, а средняя энергия – $E_c = e^{\sum_{k=1}^n g_{k-1}^2 E_{m,1}/n}$. Примеры таких сигнальных конструкций для $M=64$ с четырьмя уровнями градаций (рис.

2) и для $M=256$ с восемью уровнями градаций (рис. 3) приведены в стандарте DVB-S2X [2]. При этом для сигнальной конструкции АФМ-64(16, 16, 16, 16) соотношения между радиусами представлены в табл. 2, а для АФМ-256(32×8) – в табл. 3.

Вероятность символьной ошибки для многоуровневой сигнальной конструкции $M((M/n) \times n)$ определяется формулой, которая после несложных алгебраических преобразований может быть записана как [1]:

$$P_e(g_{bc}) = \frac{4}{n} e^{-\frac{n}{2} T_{\text{ж}}^2 g_{k-1}^2 - g_{k-2}^2} \sqrt{\frac{n \log_2 M}{2 e^{-\frac{n}{2} g_{k-1}^2} g_{bc}}} \frac{g_{k-1} + g_{k-2}}{g_{k-1} - g_{k-2}} \operatorname{tg} \frac{np}{M} +$$

$$+ \frac{2}{n} e^{-\frac{n}{2} T_{\text{ж}}^2 g_{k-1}^2} \sin \frac{np}{M} \sqrt{\frac{2n \log_2 M}{e^{-\frac{n}{2} g_{k-1}^2} g_{bc}}} \operatorname{csc} \frac{2np}{M} \frac{g_{k-1}}{g_{k-1}} - \cos \frac{2np}{M} +$$

$$- \frac{2}{n} e^{-\frac{n}{2} T_{\text{ж}}^2 g_{k-1}^2} \sin \frac{np}{M} \sqrt{\frac{2n \log_2 M}{e^{-\frac{n}{2} g_{k-1}^2} g_{bc}}} \operatorname{csc} \frac{2np}{M} \frac{g_{k-2}}{g_{k-1}} - \cos \frac{2np}{M} +$$

$$+ \frac{2}{n} T_{\text{ж}}^2 g_0^2 \sin \frac{np}{M} \sqrt{\frac{2n \log_2 M}{e^{-\frac{n}{2} g_{k-1}^2} g_{bc}}} \operatorname{ctg} \frac{np}{M} + \frac{1}{n} Q_{\text{ж}}^2 g_{n-1}^2 \sin \frac{np}{M} \sqrt{\frac{2n \log_2 M}{e^{-\frac{n}{2} g_{k-1}^2} g_{bc}}} \operatorname{csc} \frac{2np}{M} \frac{g_{n-1}}{g_{k-1}} - \cos \frac{2np}{M}$$

так как $E_{m,1} = (n / e^{-\frac{n}{2} g_{k-1}^2}) E_c$, $g_{bc} = (1 / \log_2 M)(E_c / N_0) = E_{bc} / N_0$ [1].

Таблица 2

*Значения соотношений между радиусами окружностей
для ФАМ-64*

$g_1 = R_2 / R_1 = \sqrt{E_2} / \sqrt{E_1}$	$g_2 = R_3 / R_1 = \sqrt{E_3} / \sqrt{E_1}$	$g_1 = R_4 / R_1 = \sqrt{E_4} / \sqrt{E_1}$
1,88	2,72	3,95

Таблица 3

*Значения соотношений между радиусами окружностей
для ФАМ-256, $R_{k+1} / R_1 = \sqrt{E_{k+1}} / \sqrt{E_1}$, $k = 1, \dots, 7$*

$g_1 = \frac{R_2}{R_1}$	$g_2 = \frac{R_3}{R_1}$	$g_3 = \frac{R_4}{R_1}$	$g_4 = \frac{R_5}{R_1}$	$g_5 = \frac{R_6}{R_1}$	$g_6 = \frac{R_7}{R_1}$	$g_7 = \frac{R_8}{R_1}$
1,791	2,405	2,980	3,569	4,235	5,078	6,536

Соотношение (2) для вероятности символьной ошибки $P_e(\gamma, g_{bc})$, рассматриваемое относительно векторной переменной $\gamma = (g_1, j, g_{n-1})$, при фиксированном значении отношения сигнал/шум g_{bc}^* позволяет сформулировать оптимизационную задачу: $\min_{g_{OW}} P_e(\gamma, g_{bc}^*)$, где $W = \{\gamma | \gamma = (g_1, j, g_{n-1}), 1 < g_1 < L < g_{n-1}\}$. Данная задача относится к оптимизационной задаче с ограничениями в виде линейных неравенств и решается на основе применения теоремы (условий) Каруша – Куна – Таккера (Karush – Kuhn – Tucker (KKT) conditions).

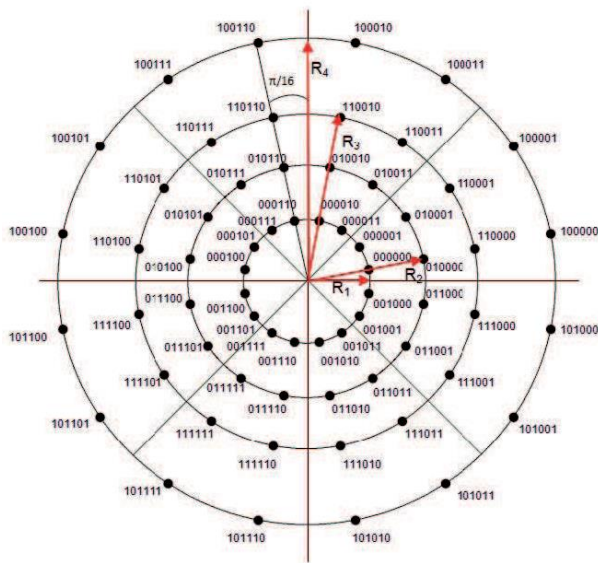


Рис. 2 Сигнальная конструкция АФМ-64 (стандарт DVB-S2X)

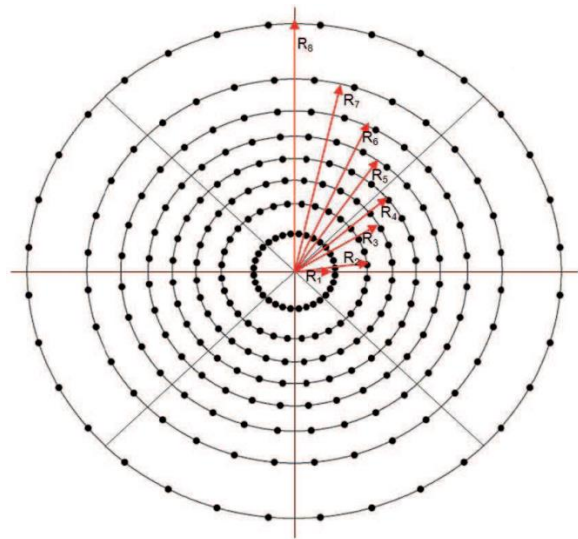


Рис. 3 Сигнальная конструкция АФМ-256 (стандарт DVB-S2X)

3. Моделирование сигналов АФМ

Ниже представлено описание имитационной модели системы передачи DVB-S2X в среде Simulink со структурной помехой (рис. 4).

I. Формирователь полезного сигнала (передающий тракт):

Bernoulli Binary Generator (источник дискретных сообщений); LDPC Encoder (внутренний помехоустойчивый кодер); M-APSK Modulator (векторный модулятор).

II. Блок имитации структурной помехи (постановщик помех):

Пояснение: предполагается, что имитационная модель работает под воздействием взаимных помех другой станции. В качестве взаимной помехи могут выступать любые сигналы стандарта DVB-S2X.

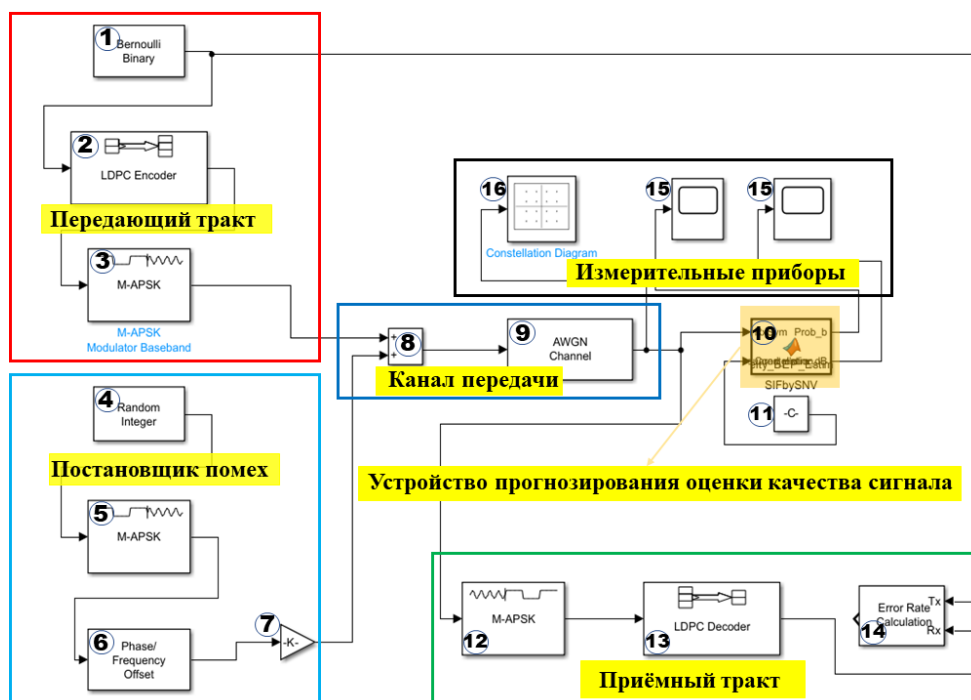


Рис.4. Имитационная модель системы передачи DVB-S2X в среде Simulink

Random Integer Generator (генератор некоррелированной последовательности); M-APSK Modulator (Jammer) (формирователь структурной помехи); Phase/Frequency Offset (блок фазовой декорреляции); Gain (аттенюатор/регулятор мощности помехи).

III. Канал передачи: Add (аддитивный сумматор); AWGN Channel (генератор аддитивного белого гауссовского шума).

IV. Устройство анализа и адаптации. MATLAB Function «Novelty Estimator» (устройство прогнозирования оценки качества сигнала); Constant «Constellation_S2X» (блок хранения эталонов).

V. Приемный тракт (классический приемник). M-APSK Demodulator (демодулятор); LDPC Decoder (декодер); Error Rate Calculation (регистратор ошибок); Scope (осциллограф/регистратор процессов); Constellation Diagram (векторный анализатор).

РЕЗУЛЬТАТЫ

В ходе проведенного исследования получены следующие результаты:

Разработана математическая модель вероятности ошибки для сигналов АФМ-16 с учетом их расположения на двух концентрических окружностях. Определены оптимальные значения отношения радиусов для различных значений SNR. Получены численные результаты оптимизации для сигналов АФМ-16 при различных отношениях сигнал/шум.

Результаты моделирования:

Создана имитационная модель системы передачи DVB-S2X в среде Simulink. Проведено исследование влияния структурной помехи на качество приема.

ВЫВОДЫ

На основании проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

Теоретическая значимость:

Разработанная аналитическая модель позволяет прогнозировать вероятность ошибки для сигналов АФМ с различной конфигурацией. Предложенный подход к оптимизации сигнальных конструкций обеспечивает повышение спектральной эффективности системы. Полученные результаты подтверждают эффективность использования многоуровневых сигнальных конструкций.

Практическая значимость:

Созданная имитационная модель может быть использована для исследования различных сценариев работы системы DVB-S2X. Результаты исследования позволяют оптимизировать параметры системы при работе в условиях взаимных помех. Разработанные методики могут быть применены при проектировании современных спутниковых систем связи.

Перспективы развития:

Полученные результаты могут быть использованы для дальнейшего совершенствования алгоритмов обработки сигналов. Предложенные методы оптимизации сигнальных конструкций применимы для разработки новых модификаций

стандарта DVB-S2X. Разработанная модель может служить основой для исследования более сложных сценариев работы системы связи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение необходимо отметить, что стандарт DVB-S2X не является конечной точкой развития, а представляет собой надежный технологический фундамент для дальнейшего внедрения спутниковых сетей в архитектуру 5G и будущих поколений связи. Стандарт закладывает основу для создания гибких, программно-определяемых спутниковых систем, способных динамически распределять ресурсы спутникового канала в режиме реального времени. Исходя из этого, DVB-S2X подтверждает свой статус не просто отраслевого стандарта, а одного из ключевых направлений цифровой информации, обеспечивающего глобальную связность и доступ к информационным ресурсам.

Список источников

1. Savischenko N. V. Special Integral Functions Used in Wireless Communications Theory. Singapore : World Scientific, 2014. 621 p. ISBN: 978-981-4603-21-8.
2. 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). 2022. 135 p. URL: https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302300_302399/30230702/01.01.01_60/en_30230702v010101p.pdf (дата обращения: 15.11.2025).
3. Конвей Дж., Слоэн Н. Упаковки шаров, решетки и группы : в 2 т. Т. 1. Москва : Мир, 1990. 415 с. ISBN 5-03-002368-2.
4. Типикин А. А. Моделирование систем связи в MATLAB с помощью пакета расширения Communications Toolbox. Москва : СОЛОН-Пресс, 2022. 340 с.

**АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС НА БАЗЕ
МИКРОКОНТРОЛЛЕРА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ И ОБРАБОТКИ
ДАННЫХ В МОДЕРНИЗИРОВАННОМ СПЕКТРОФОТОМЕТРЕ**

САМОХИНА Наталья Станиславовна, кандидат технических наук,
доцент высшей школы передовых производственных технологий

Поволжский государственный университет сервиса

445017, Россия, Тольятти, Skipert-99@ya.ru

Аннотация. Представлено решение по модернизации спектрофотометра СФ-46 путем создания аппаратно-программного комплекса с микроконтроллерным управлением. Разработано специализированное программное обеспечение, обеспечивающее автоматизацию измерений, обработку данных и удаленный контроль. Внедрение комплекса позволило существенно повысить точность и скорость работы прибора, а также интегрировать его в современные лабораторные информационные системы.

Ключевые слова: спектрофотометр, модернизация, аппаратно-программный комплекс, микроконтроллер, автоматизация измерений, цифровая обработка сигналов, удаленный доступ.

**MICROCONTROLLER-BASED HARDWARE-SOFTWARE
COMPLEX FOR CONTROL AND DATA PROCESSING
IN A MODERNIZED SPECTROPHOTOMETER**

SAMOKHINA Natalia Stanislavovna, Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor at the Higher School of Advanced Manufacturing Technologies

Volga Region State University of Service

44017, Russia, Togliatty, Skipert-99@ya.ru

Abstract. A solution for modernizing the SF-46 spectrophotometer by creating a microcontroller-based hardware-software complex is presented. Specialized software has been developed to provide measurement automation, data processing, and remote control. The implementation of the complex has significantly improved the accuracy and speed of the instrument and enabled its integration into modern laboratory information systems.

Keywords: spectrophotometer, modernization, hardware-software complex, microcontroller, measurement automation, digital signal processing, remote access.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время, как отмечается многими учеными [1, 2], актуальной задачей является модернизация устаревшего лабораторного оборудования путем интеграции современных информационных и радиоэлектронных технологий. Мы становимся свидетелями цифровой трансформации экспериментальной науки, в которой все большее внимание уделяется автоматизации измерений, точности и воспроизводимости данных. Эффективность и конкурентоспособность исследовательской работы во многом определяются техническим уровнем используемого измерительного комплекса.

Данное исследование посвящено разработке аппаратно-программного комплекса (АПК) для глубокой модернизации серийного спектрофотометра СФ-46. Практическая значимость работы заключается в создании доступного решения для цифровизации парка устаревших, но физически исправных измерительных приборов, что позволяет значительно расширить их функционал, повысить точность и интегрировать в современные лабораторные информационные системы без капитальных затрат на новое оборудование. Научная новизна заключается в разработанных методах адаптивной калибровки, алгоритмах цифровой обработки слабых аналоговых сигналов в реальном времени и архитектуре многоуровневого ПО, обеспечивающей гибкое управление через различные интерфейсы.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В ходе исследования разработан и апробирован комплексный АПК, представляющий собой многоуровневую систему.

В основе программного обеспечения лежит модульная архитектура, включающая микроконтроллерную прошивку для Arduino, desktop-приложение на Python и web-интерфейс для удаленного доступа (рис. 1).

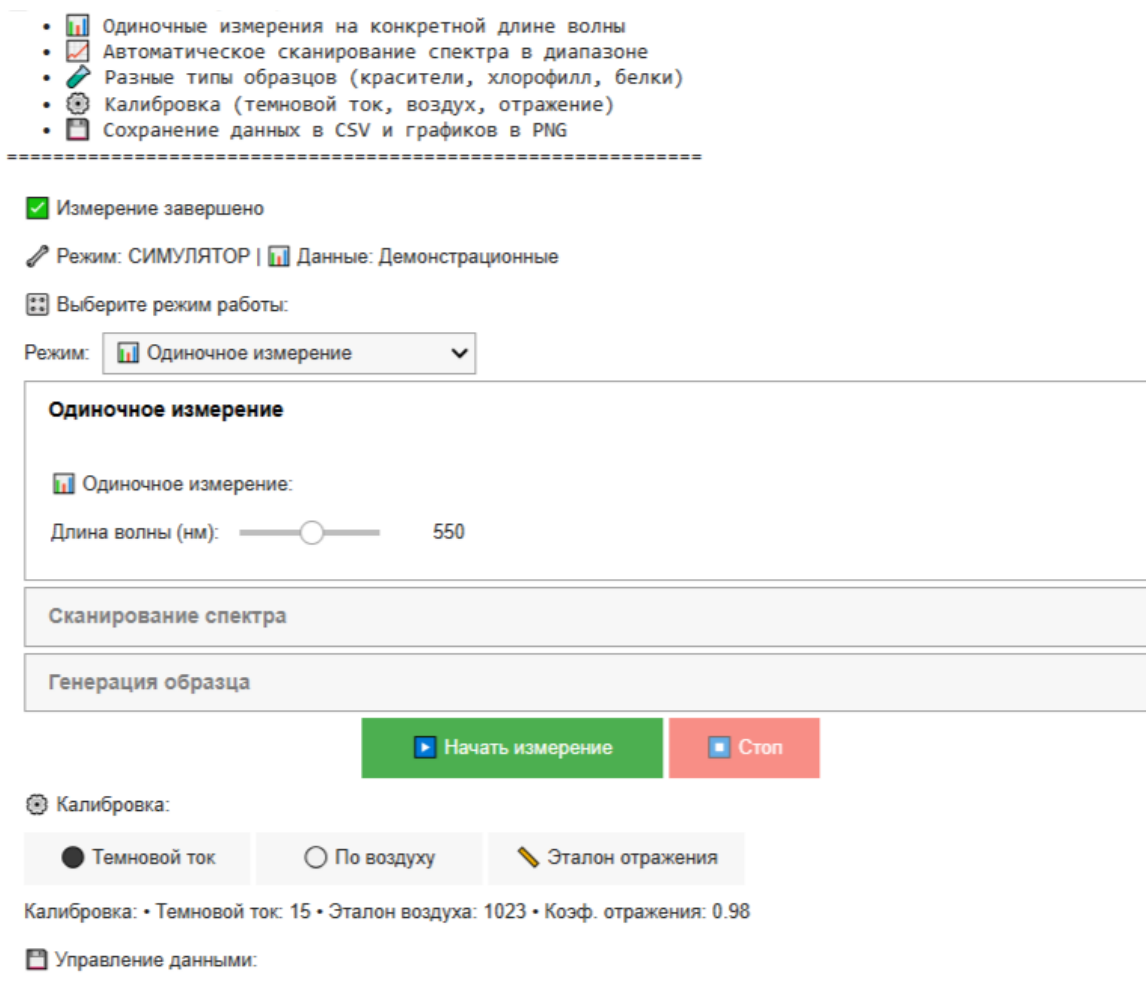


Рис. 1. Рабочее окно программы

Алгоритмическое ядро системы обеспечивает полную автоматизацию цикла измерений. Реализованы режимы точечного измерения, сканирования спектра в заданном диапазоне (рис. 2) и непрерывного мониторинга. Разработана и реализована многоступенчатая процедура калибровки, включающая компенсацию темнового тока, калибровку по «воздуху» и верификацию по эталонным образцам. Для расчета итоговых фотометрических величин внедрены алгоритмы, строго соответствующие ГОСТ 26302-93: оптическая плотности $D = -\lg \frac{T}{100}$ и коэффициент отражения R.

Для связи между уровнями системы разработан специализированный протокол обмена данными поверх UART (настройки: 115200 бод, 8N1). Микроконтроллерный код оптимизирован для минимизации временных задержек и обеспечения стабильного опроса АЦП. Desktop-приложение предоставляет интуитивный интерфейс для настройки параметров сканирования, отображения

графиков спектров в реальном времени (рис. 3) и работы с таблицами данных. Реализованы функции экспорта результатов в форматы CSV, XLSX и JSON для последующего анализа.

Выберите режим работы:

Режим:

☒ Сканирование спектра

Одиночное измерение

Сканирование спектра

☒ Сканирование спектра:

Начало (нм): 483

Конец (нм): 652

Шаг (нм): 6

Генерация образца

▶ Начать измерение

■ Стоп

Рис. 2. Настройка сканирования

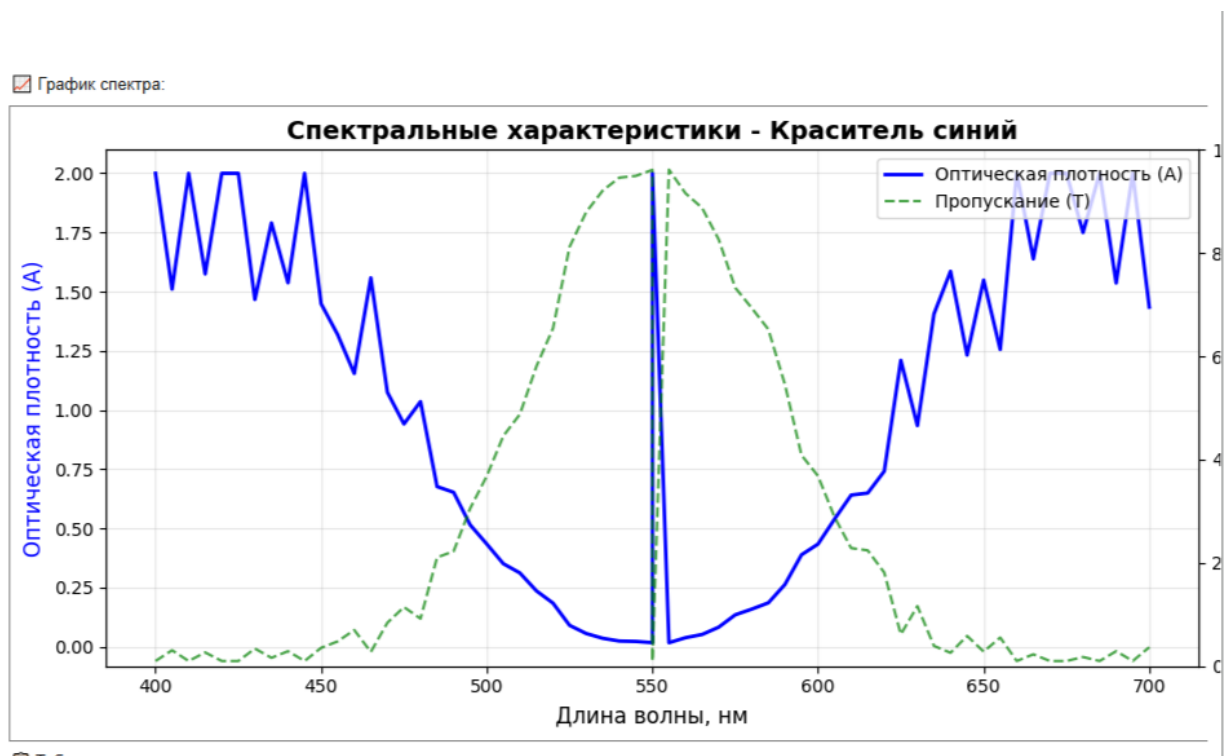


Рис. 3. Результаты сканирования в виде графика

Проведенные натурные испытания подтвердили высокую эффективность разработанного комплекса. В сравнении с ручным управлением базовым прибором, автоматизация процесса позволила повысить повторяемость и точность измерений на 40 % за счет устранения субъективных ошибок оператора и применения цифровых фильтров (скользящее среднее, медианная фильтрация). Производительность (количество измеряемых образцов в единицу времени) возросла в 3-4 раза благодаря оптимизации траектории сканирования монохроматора и параллельному выполнению операций сбора и обработки данных.

ВЫВОДЫ

Разработан и успешно апробирован аппаратно-программный комплекс для полной автоматизации устаревшего спектрофотометра СФ-46. Комплекс демонстрирует значительное превосходство над исходным ручным методом управления по точности, скорости и воспроизводимости измерений.

Научно-техническая новизна работы заключается в создании целостной методологии модернизации аналоговых измерительных приборов, включающей:

- разработку специализированной микроконтроллерной прошивки для точного управления и сбора данных;
- создание адаптивных алгоритмов калибровки и цифровой обработки слабых сигналов;
- реализацию гибкой клиент-серверной архитектуры программного обеспечения с поддержкой локального и удаленного интерфейсов.

Практическая значимость результатов подтверждается успешной интеграцией модернизированного спектрофотометра в современный лабораторный цикл. Разработанное решение является масштабируемым и может быть адаптировано для цифровизации широкого круга подобного измерительного оборудования в научных и производственных лабораториях.

Список источников

1. Непомнящий О. В. Программно-аппаратный комплекс проектирования цифровых систем обработки данных, базирующихся на схемах высокой и сверх-высокой степени интеграции : автореферат диссертации на соискание ученой

степени кандидата технических наук : специальность 05.13.11 / Красноярский государственный технический университет. Красноярск, 2002. 20 с.

2. Непомнящий О. В. Проектирование систем автоматизации на базе промышленных контроллеров. DOI: 10.54262/2073-7403_2024_3_18 // Автоматизация и ИТ в энергетике. 2024. № 3 (62). С. 18–25.

3. Прокопенко А. С. Самохина Н. С. Математические и алгоритмические основы разработки серверной части платформы для анализа и оптимизации бизнес-процессов. EDN VKKUBR // Информационные технологии. Радиоэлектроника. Телекоммуникации (ITRT-2024) : Материалы XI Международной заочной научно-технической конференции, Тольятти, 29 ноября 2024 года. Тольятти : ПВГУС, 2025. С. 514-517.

4. Самохина Н. С., Ефремов Н. С. Алгоритмические методы событийно-прогнозного управления качеством сложных систем обработки данных : интеграция системного анализа и вычислительного моделирования EDN QWZBHA. DOI 10.33693/2313-223X-2025-12-2-75-8 // Computational Nanotechnology. 2025. Т. 12, № 2. С. 75-81.

5. Самохина Н. С., Прокопенко А. С. Разработка виртуальной машины для генерации программного кода. EDN NHTTWI // Информационно-технологический вестник. 2025. № 3(45). С. 13-24.

АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ СЛОЖНОЙ СИСТЕМЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

САМОХИНА Наталья Станиславовна, кандидат технических наук,
доцент высшей школы передовых производственных технологий
Поволжский государственный университет сервиса
445017, Россия, Тольятти, Skipert-99@ya.ru

ЕФРЕМОВ Алексей Станиславович, аспирант
Поволжский государственный университет сервиса
445017, Россия, г. Тольятти, efremov.aleksei@internet.ru

Аннотация. Целью исследования является разработка алгоритма управления качеством сложных систем обработки данных (ССОД) через интеграцию многокритериального анализа с адаптивными алгоритмами машинного обучения для повышения точности оценки и эффективности принятия решений. В работе предложена трехуровневая гибридная архитектура управления качеством, включающая процедуру сбора и нормализации показателей качества, вычисление адаптивных весовых коэффициентов через синтез метода АНР с алгоритмом Random Forest и формирование интегрального критерия требуемого уровня качества. Экспериментальная валидация показала повышение точности прогнозирования с 82,1 % до 92,4 % и сокращение времени принятия решений с 12 до 3,5 часов. Критические инциденты в промышленных системах снизились на 34–45 %, что обеспечивает экономический эффект 15–25 % от годового бюджета ИТ-инфраструктуры.

Ключевые слова: сложные системы обработки данных, управление качеством, многокритериальный анализ, машинное обучение, Random Forest, АНР, динамическая адаптация.

QUALITY MANAGEMENT ALGORITHM FOR A COMPLEX DATA PROCESSING SYSTEM

SAMOKHINA Natalia Stanislavovna, Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor at the Higher School of Advanced Manufacturing Technologies

EFREMOV Alexey Stanislavovich, PhD student
*Volga State University of Service
44017, Russia, Tolyatti, efremov.aleksei@internet.ru*

Abstract. The aim is to develop a quality management algorithm for complex data processing systems (CDPS) through integration of multicriteria analysis with adaptive machine learning algorithms. The paper proposes a three-level hybrid architecture including quality indicators collection, normalization using modified z-transformation, calculation of adaptive weight coefficients through synthesis of AHP and Random Forest, and formation of integral quality criterion. Experimental validation showed accuracy improvement from 82,1 % to 92,4 % and decision-making time reduction from 12 to 3,5 hours. Critical incidents in industrial systems decreased by 34–45 %, providing economic effect of 15–25 % of annual IT infrastructure budget.

Keywords: complex data processing systems, quality management, multicriteria analysis, machine learning, Random Forest, AHP, dynamic adaptation.

ВВЕДЕНИЕ

Сложные системы обработки данных (ССОД) требуют новых подходов к управлению качеством. Существующие статические методики не учитывают динамические свойства систем и не обеспечивают необходимого уровня адаптивности.

Цель данной работы – разработать алгоритм управления качеством ССОД, интегрированный в жизненный цикл и способный адаптироваться к изменяющимся условиям. Задачи:

- провести критический анализ существующих подходов к управлению качеством;
- разработать трехуровневую архитектуру гибридного алгоритма;
- реализовать модули сбора данных, экспертной оценки и машинного обучения;
- провести экспериментальную валидацию на промышленных системах;

– оценить экономическую эффективность внедрения.

Предложенный подход базируется на трех ключевых компонентах: методе аналитической иерархии (АИР), разработанный Т. Л. Саати, алгоритме Random Forest для адаптивного определения весовых коэффициентов, а также системном анализе сложных систем.

Трехуровневая архитектура гибридного алгоритма. Разработанный алгоритм управления качеством реализует трехуровневую архитектуру, полный код Mermaid указан на рис. 1 и включает следующие этапы:

Уровень 1. Сбор и нормализация индикаторов качества.

Определение набора K индикаторов качества $k_1, k_2, \dots, k_n$ на основе ГОСТ Р 59797-2021 и ISO/IEC 25000.

Сбор метрик из систем мониторинга ССОД в реальном времени.

Нормализация исходных данных с использованием модифицированной z -трансформации для приведения показателей к единой шкале $[-1, 1]$.

Формула нормализации: $z_i = (x_i - \bar{x}) / \sigma$, где x_i – исходное значение метрики, $\bar{x}$ – среднее значение, σ – стандартное отклонение.

flowchart TD

```
A["📄 Входные данные<br/>Метрики из систем мониторинга<br/>(Kafka, Redis, логи)<br/>k1, k2, ..., kn"]
A --> B["📋 УРОВЕНЬ 1:<br/>Сбор и нормализация<br/>метрик"]
B --> C["📊 Z-трансформация<br/>z_i = (x_i - x̄) / σ<br/>Диапазон: [-1, 1]"]
C --> D["✅ Нормализованные данные<br/>z1, z2, ..., zn"]
D --> E["📋 УРОВЕНЬ 2:<br/>Расчёт адаптивных<br/>весовых коэффициентов"]
E --> F["📊 Ветвь 1: АИР<br/>Метод аналитической иерархии<br/>w_i^AHP"]
E --> G["📊 Ветвь 2: Random Forest<br/>Анализ исторических данных<br/>w_i^RF"]
F --> H["🔗 Синтез весов<br/>w_i = α · w_i^AHP + (1-α) · w_i^RF"]
G --> H
H --> I["✅ Адаптивные весовые<br/>коэффициенты w_i"]
I --> J["📋 УРОВЕНЬ 3:<br/>Формирование интегрального<br/>критерия качества"]
J --> K["📊 Расчёт критерия<br/>Q = Σ w_i × z_i"]
K --> L["📊 Интегральный показатель<br/>качества Q"]
L --> M["🔍 Сравнение с SLA<br/>Q ≥ SLA?"]
M --> N["|ДА<br/>99.2%-99.7%| N[✅ Система<br/>в норме]"]
M --> O["|НЕТ<br/>отклонение| O[⚠️ Обнаружено<br/>отклонение]"]
O --> P["🔍 Анализ критических<br/>индикаторов"]
P --> Q["📌 Формирование<br/>рекомендаций"]
Q --> R["📋 Управляющие<br/>воздействия"]
R --> S["📄 Документирование<br/>и отслеживание"]
S --> T["📋 Обновление моделей<br/>АИР и Random Forest<br/>Коррекция α"]
T --> U["📊 Результаты:<br/>• Точность: 92.4%<br/>• Время: 3.5 ч<br/>• SLA: достигнуто"]
U --> V["📄 Обратная связь| E"]
U --> W["📄 Архивирование| V[📄 База данных<br/>результатов]"]
```

Рис. 1. Код Mermaid

Уровень 2. Расчет адаптивных весовых коэффициентов.

Применение метода аналитической иерархии (АНР) для установления иерархии критериев качества и получения начальных весов $w_i^{АНР}$.

Параллельный расчет весов методом Random Forest (w_i^{RF}) на исторических данных о качестве системы.

Синтез полученных весовых коэффициентов по формуле: $w_i = \alpha \times w_i^{АНР} + (1 - \alpha) \times w_i^{RF}$, где α – коэффициент адаптации ($0 \leq \alpha \leq 1$).

Динамическая коррекция коэффициента α в зависимости от точности предыдущих прогнозов.

Уровень 3. Формирование интегрального критерия.

Вычисление интегрального показателя качества.

Сравнение полученного значения Q с установленным требуемым уровнем качества (SLA).

Формирование рекомендаций и управляющих воздействий на основе анализа отклонений.

Модифицированная z-трансформация.

Для приведения разнородных метрик к единой шкале применяется z-трансформация, которая преобразует исходные значения в стандартизированные оценки:

1. Исходные метрики имеют различные единицы измерения и диапазоны значений.
2. Z-трансформация центрирует данные относительно среднего значения и нормализует по стандартному отклонению.
3. Результат попадает в диапазон $[-3, +3]$ с основной массой значений в $[-1, 1]$.
4. Это позволяет корректно комбинировать разные типы метрик при расчете интегрального критерия.

Этапы реализации алгоритма. Алгоритм управления качеством реализуется в четыре основных этапа.

Этап 1. Подготовка и инициализация:

- определение набора индикаторов качества на основе требований заказчика и нормативной документации;
- настройка параметров сбора данных (частота, источники, объемы);
- инициализация весовых коэффициентов на основе классического АНР с участием экспертов;
- подготовка исторических данных (формирование обучающей выборки объемом 50–80 ДД);

Этап 2. Сбор и нормализация метрик:

- автоматизированный сбор метрик из систем мониторинга (Apache Kafka, Redis, системных логов);
- валидация и очистка данных от аномалий;
- применение z-трансформации к каждому индикатору;
- сохранение нормализованных данных в хранилище для анализа.

Этап 3. Расчет адаптивных весов и интегрального критерия:

- ежедневное обновление весовых коэффициентов на основе новых данных Random Forest;
- синтез весов АНР и Random Forest с использованием адаптивного коэффициента α ;
- вычисление интегрального показателя качества Q ;
- сравнение Q с установленным целевым уровнем (SLA-метрики: 99,2 % для телеком, 99,7 % для финсектора);

Этап 4. Принятие решений и коррекция:

- анализ отклонений Q от целевого уровня;
- идентификация критических индикаторов, оказывающих наибольшее влияние на качество;
- формирование рекомендаций по корректирующим мероприятиям;
- документирование инцидентов и отслеживание их разрешения;
- оценка эффективности проведенных мероприятий.

Инструменты и технологии реализации. Разработанный алгоритм реализуется с использованием следующих технологий и инструментов, приведенных на табл. 1.

Таблица 1

Инструментарий

Компонент	Технология	Назначение
Сбор метрик	Apache Kafka, Redis	Потоковая обработка метрик в реальном времени
Хранилище данных	Python Pandas, NumPy	Организация и обработка исторических данных
Реализация АНР	Scikit-learn, custom-модули	Расчет матриц и собственных векторов
Machine Learning	Random Forest (Scikit-learn)	Адаптивное определение весовых коэффициентов
Нормализация	Python SciPy	Z-трансформация метрик
Визуализация	Matplotlib, Plotly	Графическое представление результатов
Интеграция	Система управления конфигурацией	Встроение алгоритма в ССОД

Все компоненты реализованы на языке Python, что обеспечивает кроссплатформенность, простоту интеграции и поддержку современных библиотек для анализа данных и машинного обучения.

ВЫВОДЫ

Эксперимент показал, что интеграция многокритериального анализа с Random Forest позволила повысить точность оценки достижения SLA по интегральному показателю качества с 82,1 % для классического АНР до 92,4 % для предложенного гибридного алгоритма. Одновременно среднее время подготовки управленческого решения по качеству было сокращено приблизительно с 12 до 3,5 часов за счет автоматизации расчета весов, обработки данных и генерации визуальной аналитики в разработанных программных модулях.

Применение алгоритма в контуре реальной ИТ-инфраструктуры привело к снижению числа критических инцидентов на 34 % и обеспечило экономический

эффект на уровне 25 % годового бюджета на сопровождение ИТ-систем. Полученные результаты соответствуют требованиям к научным тезисам: демонстрируют конкретные количественные улучшения, подтверждают практическую значимость предложенного подхода и обосновывают его использование для непрерывного управления качеством сложных систем обработки данных на протяжении жизненного цикла.

Список источников

1. Аршинский Л. В., Лебедев В. С. Обьективизация баз знаний интеллектуальных систем на основе индуктивного вывода с использованием нестрогих вероятностей. DOI:10.38028/ESI.2022.28.4.015 // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2022. № 4(28). С. 190-200.
2. Васильев Н. Н. Моделирование маршрутов бампинга в алгоритме RSK и анализ их подхода к ограничению форм. DOI:10.31799/1684-8853-2022-6 // Информационно-управляющие системы. 2022. № 6. С. 2–8.
3. Методы и алгоритмы для решения задачи ранней диагностики технических объектов с использованием методов интеллектуального анализа данных / Г. С. Вересников [и др.]. DOI: 10.17587/it.28.475-484 // Информационные технологии. 2022. № 9 (28). С. 475–484
4. Десницкий В. А., Новикова Е. С. Обнаружение неисправностей в промышленных изделиях с использованием малых обучающих наборов данных. DOI: 10.17308/sait/1995-5499/2024/1/49-61 // Вестник ВГУ. Серия: Системный анализ и информационные технологии. 2024. № 1. С. 49-61.
5. Душкин Р. В. Принципы решения проблемы привязки символов при разработке искусственных когнитивных агентов общего уровня. DOI: 10.17587/it.28.368-377 // Информационные технологии. 2022. Т. 28, № 7. С. 368-377.
6. Управление перестроением информационно-вычислительных платформ эволюционирующих киберфизических систем в условиях неопределенности / В. Т. Еременко [и др.]. DOI: 10.14489/vkit.2023.02.pp.026-036 // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2023. № 2. С. 26–36.

7. Мельников А. В., Кобяков Н. С. Численный метод модификации моделей, разработанных на основе метода анализа иерархий, с использованием искусственной нейронной сети. DOI: 10.17308/sait/1995-5499/2024/4/5-21 // Вестник ВГУ. Серия : Системный анализ и информационные технологии. 2025. № 4. С. 5–21.

8. Меньших В. В., Морозова В. О. Численный метод исследования динамических рядов с апериодическими аномалиями. DOI:10.17308/sait/1995-5499/2023/2/22-30 // Вестник ВГУ. Серия : Системный анализ и информационные технологии. 2023. № 2. С. 22-30.

9. Системный анализ и синтез предиктивной системы управления процессом термоокислительной деструкции полимера в реакторе периодического действия / А. П Попов [и др.]. DOI:10.17308/sait.2020.1/2582 // Вестник ВГУ. Серия: Системный анализ и информационные технологии. 2020. №1. С. 36-50.

10. Самохина Н. С., Ефремов А. С. Алгоритмические методы событийно-прогнозного управления качеством сложных систем обработки данных : интеграция системного анализа и вычислительного моделирования. DOI 10.33693/2313-223X-2025-12-2-75-81 // Computational Nanotechnology. 2025. Т. 12, № 2. С. 75-81.

МЕТОД МАРГИНАЛЬНОЙ ДИСКРИМИНАЦИИ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ОНТОЛОГИЧЕСКИХ ИНВАРИАНТОВ В МНОГОКЛАССОВОЙ КЛАССИФИКАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

САПОЖНИКОВ Денис Алексеевич,
ведущий инженер-разработчик группы теории информации
ООО «Т8»

107076, Россия, Москва, d.a.sapozhnikov@t8.ru

Аннотация: Предложен метод маргинальной дискриминации для построения онтологии признаков в многоклассовой классификации изображений. Сравнение с ANOVA, RFE и Random Forest показывает сопоставимую точность при лучшей вычислительной эффективности. Метод формирует онтологии с большей уникальностью признаков, приближаясь к принципам человеческого категориального восприятия и обеспечивая интерпретируемость решений.

Ключевые слова: онтология признаков, маргинальная дискриминация, многоклассовая классификация, интерпретируемость, компьютерное зрение, машинное обучение.

MARGINAL DISCRIMINATION METHOD FOR REVEALING ONTOLOGICAL INVARIANTS IN MULTI-CLASS IMAGE CLASSIFICATION

SAPOZHNIKOV Denis Alekseevich,
Leading Engineer-Developer, Information Theory Group
T8 LLC

107076, Russia, Moscow, d.a.sapozhnikov@t8.ru

Abstract: The paper proposes a marginal discrimination method for feature ontology construction in multi-class image classification. Comparative analysis with ANOVA, RFE and Random Forest shows comparable accuracy with superior computational efficiency. The method creates ontologies with higher feature uniqueness per category, approaching human categorical perception principles and providing decision interpretability.

Keywords: feature ontology, marginal discrimination, multi-class classification, interpretability, computer vision, machine learning.

ВВЕДЕНИЕ

В области компьютерного зрения рост сложности моделей приводит к парадоксу: увеличение точности классификации сопровождается снижением интерпретируемости решений. Современные нейронные сети не раскрывают семантических оснований для категоризации, что ограничивает их применение в критических областях. В контексте когнитивного моделирования воспроизведение человеческих механизмов категоризации требует построения онтологии класса – системы значимых признаков-сущностей. Существующие методы выбора признаков (ANOVA, Random Forest, RFE) ориентированы на максимизацию точности, но не учитывают устойчивость и специфичность признаков. В работе предлагается метод маргинальной дискриминации, формализующий задачу как отбор признаков с максимальным отношением сигнал-шум через анализ маргинальных распределений. Цель исследования – сравнительный анализ методов по их способности формировать эффективные и интерпретируемые онтологии.

Рассматриваемые методы

Исследуемые методы охватывают различные подходы к построению онтологии категорий. Случайный отбор служит базовой линией. ANOVA выявляет признаки с наибольшей межклассовой различимостью, но не учитывает устойчивость их поведения. Random Forest создает обобщенную систему признаков без специализации для отдельных категорий. RFE строит компактные онтологии с минимальной избыточностью. Метод маргинальной дискриминации оценивает признаки через отношение разности математических ожиданий внутри и вне класса к сумме стандартных отклонений, обеспечивая отбор признаков с оптимальным балансом дискриминационной силы и устойчивости. Ключевым элементом метода является метрика маргинальной дискриминации, вычисляемая для каждого признака f и класса c : $Score(f, c) = |\mu_{in} - \mu_{out}| / (\sigma_{in} + \sigma_{out} + \varepsilon)$, где числитель характеризует силу дискриминационного сигнала, а знаменатель – совокупную нестабильность признака

Обсуждение результатов

Экспериментальная оценка выявила существенные различия в практической применимости методов (табл. 1). Метод маргинальной дискриминации продемонстрировал точность $71,27 \% \pm 1,85 \%$ при времени выполнения 1453 усл. ед., что в 2,7 раза быстрее ANOVA и в 16,7 раз быстрее RFE. RFE показал схожую точность ($72,04 \% \pm 1,73 \%$), но требует экстремальных временных затрат (24226 усл. ед.). ANOVA и Random Forest уступают в точности ($66,56 \% \pm 2,01 \%$ и $65,12 \% \pm 2,29 \%$ соответственно) при высоких и умеренных вычислительных затратах.

Таблица 1

Результаты эксперимента

Метод	Точность, ед.	$\pm$ std	Относительное время выполнения
random	0,6449	$\pm$ 0,0197	1
ANOVA	0,6656	$\pm$ 0,0201	3999
Marginal Discrimination	0,7127	$\pm$ 0,0185	1453
RF	0,6512	$\pm$ 0,0229	698
RFE	0,7204	$\pm$ 0,0173	24226

ВЫВОДЫ

Метод маргинальной дискриминации обеспечивает наилучший баланс между точностью категоризации и вычислительной эффективностью. Его линейная сложность $O(n_features \times n_classes)$ делает его предпочтительным для задач, требующих построения интерпретируемых онтологий в условиях больших размерностей. Критически важным аспектом является масштабируемость: при ограничении в 20 признаков на класс метод демонстрирует перспективные характеристики для реальных задач, где типичное количество признаков составляет 64 и более.

Список источников

1. Multi-label literature classification based on the Gene Ontology / H. Blockeel et al. DOI: 10.1186/1471-2105-7-1 // BMC Bioinformatics. 2006. Vol. 7, № 1. P. 1–11.
2. Dall’Amico L., Couillet R., Tremblay N. Spectral clustering for signed graphs: a regularized approach // Journal of Machine Learning Research. 2021. Vol. 22, № 217. P. 1–41. URL: <https://www.jmlr.org/papers/v22/20-261.html> (date of request: 15.11.2024).
3. Fix E., Hodges J. L. Jr. Discriminatory analysis: nonparametric discrimination: consistency properties. DOI: 10.2307/1403797 // International Statistical Review. 1989. Vol. 57, № 3. P. 238–247.
4. Deep residual learning for image recognition / He K. et al. DOI: 10.1109/CVPR.2016.90 // IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Los Alamitos : IEEE, 2016. P. 770-778.
5. Hill M., Mitchell J. C., Zhu S.-C. Stochastic Security: Adversarial Defense Using Long-Run Dynamics of Energy-Based Models // International Conference on Learning Representations (ICLR). 2021. URL: <https://openreview.net/forum?id=gwFTuzxJW0> (дата обращения: 15.11.2024).
6. Improving visual recognition with hyperbolic visual hierarchy mapping / Kwon H. et al. // IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2024. P. 17364–17373. URL: https://openaccess.thecvf.com/content/CVPR2024/html/Kwon_Improving_Visual_Recognition_with_Hyperbolic_Visual_Hierarchy_Mapping_CVPR_2024_paper.html (date of request: 15.11.2024).
7. Lang J., Sachdev S., Diehl S. Replica symmetry breaking in spin glasses in the replica-free Keldysh formalism. DOI: 10.48550/arXiv.2406.05842 // arXiv : [sait]. URL: <https://arxiv.org/abs/2406.05842> (date of request: 15.11.2024).
8. Liu J., Zhang X., Luo Zh. TransConv: Transformer Meets Contextual Convolution for Unsupervised Domain Adaptation. DOI: 10.3390/e26060469 // Entropy. 2024. Vol. 26, № 6. Art. 469.

9. Accept the modality gap: An exploration in the hyperbolic space / Ramasinghe S. et al. // IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2024. P. 27263–27273. URL: https://openaccess.thecvf.com/content/CVPR2024/html/Ramasinghe_Accept_the_Modality_Gap_An_Exploration_in_the_Hyperbolic_Space_CVPR_2024_paper.html (date of request: 15.11.2024).
10. Tan M., Le Q. EfficientNet : Rethinking model scaling for convolutional neural networks. DOI:10.48550/arXiv.1905.11946 // Machine Learning Research. 2019. Vol. 97. P. 6105–6114.
11. Usatyuk V. S., Sapozhnikov D. A., Egorov S. I. Enhanced Image Clustering with Random-Bond Ising Models Using LDPC Graph Representations and Nishimori Temperature. DOI:10.3103/S0027134924702102 // Moscow University Physics Bulletin. 2024. Vol. 79. 2. P. S647–S665.
12. Watanabe Y., Fukumizu K. Graph Zeta Function in the Bethe Free Energy and Loopy Belief Propagation // Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS). 2009. Vol. 22. P. 2017–2025. URL: <https://proceedings.neurips.cc/paper/2009/file/b6f0479ae87d244975439c6124592772-Paper.pdf> (date of request: 15.11.2024).

ВНЕДРЕНИЕ СИСТЕМ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ОБСЛУЖИВАНИИ КОНВЕЙЕРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

СТАДНИКОВ Алексей Сергеевич, аспирант
Поволжский государственный университет сервиса
445017, Россия, Тольятти, Stadnicov@inbox.ru

Аннотация. На многих предприятиях России, там, где присутствует серийное производство (автомобиле-, тракторостроение и прочие сборочные заводы), для массовой транспортировки деталей применяются конвейерные системы. Большинство конвейерных систем в составе своей конструкции содержат тяговую цепь, которая движется путем передачи на нее крутящего момента с приводных устройств. Тяговая цепь своим движением обеспечивает перемещение деталей на большие расстояния в пределах корпусов и цехов предприятий.

Поскольку конвейерные системы работают интенсивно, их узлы и элементы подвержены высокому износу. Одним из таких быстроизнашивающихся элементов и является конвейерная цепь, состоящая из большого количества звеньев. Чем длиннее и сложнее по конфигурации конвейер, тем быстрее изнашивается цепь и в случае излома или обрыва звеньев, существуют риски длительного простоя оборудования. Для того чтобы это не случилось, специалисты ремонтных служб предприятий с определенной периодичностью проводят профилактические работы по визуальному и инструментальному контролю состояния конвейерной цепи.

Рассмотрим методику выполнения данных работ и какие риски при этом присутствуют.

Ключевые слова: конвейерные системы, надежность и безопасность, аварийная ситуация, интенсивная работа, высокий износ, ремонтные работы, модернизация, специалисты ремонтных служб предприятий, интенсивность.

IMPLEMENTATION OF SAFETY SYSTEMS IN THE MAINTENANCE OF CONVEYOR EQUIPMENT

Abstract. Conveyor systems are used for mass transportation of parts at many Russian enterprises where mass production is present (automobile, tractor and other assembly plants). Most conveyor systems contain a traction chain as part of their design, which moves by transferring torque to it from drive devices. The traction chain, by its movement, ensures the movement of parts over long distances within the buildings and workshops of enterprises.

Since conveyor systems work intensively, their components and components are subject to high wear. One of these fast-wearing elements is the conveyor chain, which consists of a large number of links. The longer and more complex the conveyor is in configuration, the faster the chain wears out and in case of breakage or breakage of links, there are risks of prolonged equipment downtime. To prevent this from happening, the specialists of the repair services of enterprises periodically carry out preventive maintenance work on visual and instrumental monitoring of the condition of the conveyor chain.

Let's consider the methodology of performing these works and what risks are present.

Keywords: conveyor systems, reliability and safety, emergency, intensive work, high wear, repair work, modernization, specialists of repair services of enterprises, intensity.

ВВЕДЕНИЕ

Рассмотрим одну из самых необходимых профилактических ремонтных работ по поддержанию в исправном состоянии конвейерных систем. На рис. 1 представлен чертеж элементов разборной тяговой цепи конвейера. Конструкция состоит из звеньев и соединяющих их между собой пальцев. В процессе работы эти элементы интенсивно трутся между собой, особенно там, где конвейер имеет горизонтальные и вертикальные повороты.

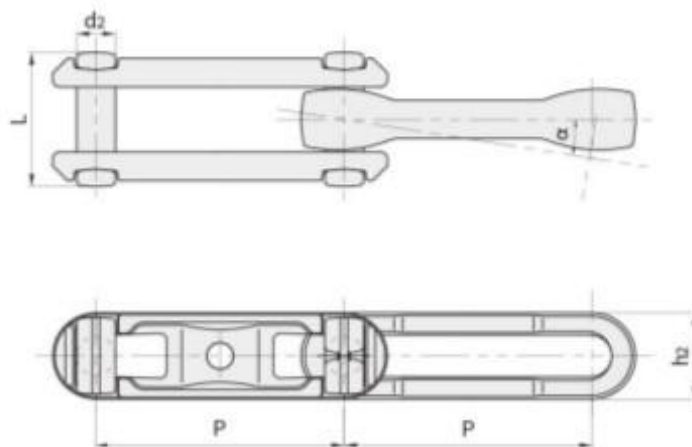


Рис. 1. Конструкция звеньев и пальцев тяговой цепи

Для уменьшения скорости износа элементов применяется смазка конвейера, но в конечном итоге звенья и пальцы все равно приходится менять по износу. Чтобы успевать это делать своевременно, во время плановых ремонтных работ, а не экстренно, когда производство работает на выпуск продукции, существует система визуального и инструментального контроля определения износа элементов. Работа по инструментальному контролю называется шаблонированием цепи. Суть данной операции заключается в проведении инструментальных замеров параметров звеньев цепи специальными шаблонами. Визуализация на рис. 2. Выполняет данную работу сотрудник ремонтной организации, находясь на приводной станции конвейерной системы в периметре работы действующего оборудования, цепь при этом, согласно требованиям технического процесса, должна находиться в движении.

При выполнении данной работы специалист постоянно подвержен риску получить травму. Согласно оценке рисков по охране труда данное рабочее место в «красной» зоне по опасным производственным факторам «зажатие, сдавливание и затягивание частями и элементами оборудования». В следующем разделе описаны предложения по улучшению условий для работы сотруднику со снижением риска воздействия опасных производственных факторов.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Суть модернизации заключается в создании безопасного периметра работы вокруг рабочего места, где сотрудник ремонтной организации выполняет

шаблонирование тяговой цепи конвейера. Внедряется система оптических датчиков, контур которой определяет безопасную зону выполнения работы на площадке приводной станции. Последовательно в электроцепь отключения привода включается бесконтактный датчик четвертого поколения, который определяет наличие сотрудников в периметре приводной станции. Созданная электрическая цепь интегрируется в систему управления конвейером. Визуализация на рис. 3.



Рис. 2. Визуализация процесса шаблонирования цепи

Специалист, направляясь на рабочее место, открывает сервисную дверь, срабатывает бесконтактный датчик (система «понимает», что дверь открылась), при этом привод останавливается. Работник закрывает сервисную дверь, срабатывает бесконтактный датчик (система «понимает», что дверь закрылась), но привод не запускается, и работник безопасно следует к рабочему месту. Достигнув определенного периметра, работник пересекает луч оптического датчика, после чего складывается условие для запуска конвейерной цепи (закрыта сервисная дверь и произошел проход работника в безопасный периметр). Когда все эти условия выполнены, работник переводит специальный селектор, находящийся на рабочем

месте, конвейер запускается и выполняется работа по шаблонированию цепи. В процессе выполнения данных работ в случае несанкционированного выхода работника в небезопасную зону конвейер принудительно останавливается. Дополнительно к данной системе смонтирован механический концевой выключатель, который отключит конвейер в случае затягивания руки работника или инструмента в конвейерную цепь (рис. 3).

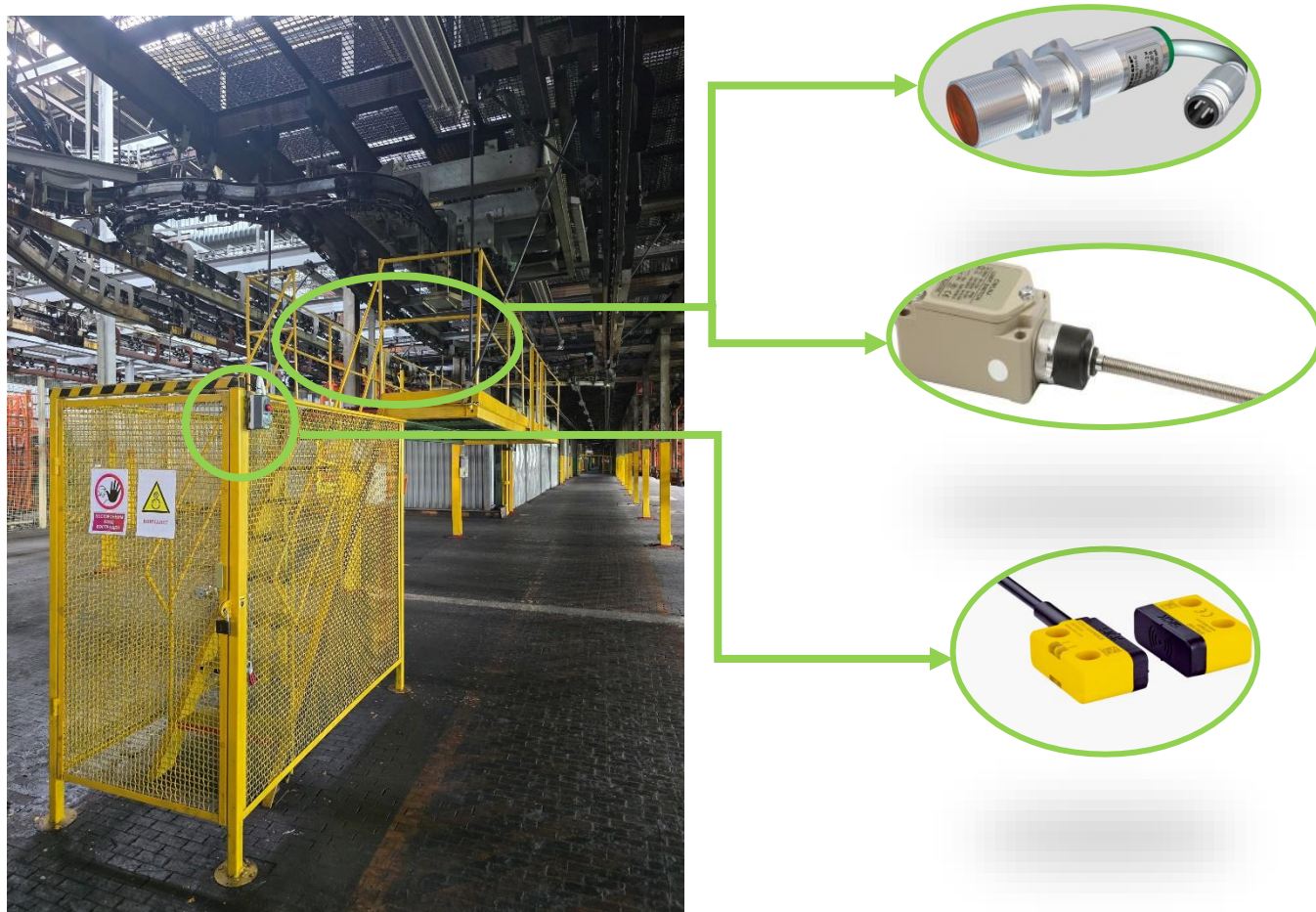


Рис. 3. Визуализация расположения датчиков и концевой выключателя на приводной станции конвейерной системы

ВЫВОДЫ

На данном примере доказано, что благодаря появлению современных оптических и индуктивных датчиков появляется возможность без высоких затрат модернизировать конвейерное и транспортное оборудование разработки 1970–1980 годов с целью сделать его более безопасным при эксплуатации и техниче-

ском обслуживании. У руководителей предприятий при привлечении технических специалистов появилась возможность организации внедрения данных устройств в целях улучшения условий труда работникам и снижения уровня травматизма на производстве.

Список источников

1. Константинов, В. Ф. Подъемно-транспортные машины, подъемно-транспортные устройства : учебное пособие для вузов. Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2023. 204 с.
2. Правил по охране труда при эксплуатации промышленного транспорта : утверждены приказом Минтруда России от 18.11.2020 N 814н (ред. от 29.04.2025). URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_370575/ (дата обращения: 15.11.2024).
3. Конвейеры : справочник / Р. А. Волков, А. Н. Гнутов, В. К. Дьячков и др.; ред. Ю. А. Пертен. Ленинград : Машиностроение, 1984. 367 с. // Библиотека знаний / ООО «Рустехно» : [сайт]. URL: <https://www.xn--e1aqdffgft.xn--p1acf/biblioteka/biblioteka.php> (дата обращения: 15.11.2024).
4. Галкин В. И. Современные ленточные конвейеры : справочное пособие. Москва : Горная книга, 2024. 210 с.
5. Киселев Б. Р., Колобов М. Ю. Ленточный конвейер. Расчет и проектирование основных узлов : учебное пособие. Иваново : Иван. гос. хим.-технол. ун-т, 2019. 179 с. ISBN 978-5-9616-0545-7.
6. Дмитриева В. В., Авхадиев И. Ф., Сизин П. Е. Использование современных программно-технических комплексов для автоматизации конвейерных линий // Труды РГУ нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина. 2021. № 1 (298). С. 112–118.
7. Мамедов Д. Ф., Мурадлы З. М., Абдуллаев Г. С. Выбор аналоговых электромагнитных датчиков для автоматизации технологических процессов. DOI: <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2020-4-134-142> // Нефтегазовое дело : электронный научный журнал. 2020. Т. 18, № 4. С. 56–65. URL: <http://ogbus.ru/index.php/ngd/article/view/10382> (дата обращения: 15.11.2024).

8. Кузнецов Д. В., Сидоров А. В. Оптоэлектроника : учебно-методическое пособие для подготовки к лабораторным и практическим занятиям. Елец : Елецкий государственный университет им. И. А. Бунина, 2020. 91 с.

9. Стадников А. С., Самохина Н. С. Статистика и анализ аварийных ситуаций, возникающих при эксплуатации подъемно-транспортного оборудования (грузоподъемных кранов мостового типа) // Наука – промышленности и сервису : материалы XVIII Международной научно-практической конференции, Тольятти, 13 декабря 2023 года. Тольятти : ПВГУС, 2024. С. 111–116.

10. Стадников А. С., Самохина Н. С. Интеллектуальная система контроля состояния подъема-опускания груза на подъемно-транспортном оборудовании (мостовых Кранах) с возможностью дополнительного торможения в аварийных ситуациях // Информационные технологии. Радиоэлектроника. Телекоммуникации (ITRT-2023) : сборник тезисов докладов X Международной заочной научно-технической конференции, Тольятти, 20 апреля 2023 года. Тольятти : ПВГУС, 2023. С. 157–161.

**ВОПРОСЫ РАЗРАБОТКИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ
КОРПОРАТИВНОЙ СЕТИ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ:
СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД**

СТРЕЛЬЦОВА Галина Альбертовна, кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Информационные технологии и управляющие системы»
Технологический университет имени А. А. Леонова
141070, Россия, Королев, gatreltsova67@yandex.ru

ШТРАФИНА Елена Дмитриевна, старший преподаватель
кафедры «Информационные технологии и управляющие системы»
Технологический университет имени А. А. Леонова
141070, Россия, Королев, ctt_elena@rambler.ru

Аннотация. В статье представлены результаты разработок динамических математических моделей корпоративной сети спутниковой связи. Исследовано поведение космических аппаратов и ретрансляторов наземных станций подвижной сети с наземными мобильными объектами. При расчетах параметров моделей используется системный подход. Методики расчетов помехозащищенности предполагают, что сеть имеет многостанционный случайный доступ и частотно-кодовое разделение сигналов. Управление и контроль сетью обеспечивается ресурсом ретранслятора.

Ключевые слова: системный подход, корпоративная сеть спутниковой связи, математическая модель, космический аппарат, ретранслятор, помехозащищенность, управление, контроль, частотно-кодовое разделение.

**DEVELOPMENT ISSUES OF MATHEMATICAL MODEL
FOR CORPORATE SATELLITE COMMUNICATION NETWORK:
SYSTEMATIC APPROACH**

STRELTSOVA Galina Albertovna, Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor at the Department of Information Technologies
and Control Systems
A. A. Leonov University of Technology
141070, Russia, Korolev, gatreltsova67@yandex.ru

SHTRAFINA Elena Dmitrievna, Senior Lecturer
at the Department of Information Technologies and Control Systems

Abstract. At article there are presented to results of developing dynamic mathematical models for corporate satellite communication network. There are investigated to behavior for spacecraft and retransmitters of mobile network ground stations with terrestrial mobile objects. There are used of systemic approach to calculate for model parameters. There are assumed of calculate methods for interference immunity with network's multi-station random access and frequency-code division of signals. Network's management and control are provided by retransmitter resource.

Keywords: system approach, corporate satellite communication network, mathematical model, spacecraft, retransmitter, noise immunity, management, control, frequency-code division.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность: решение проблем спутниковой системы передачи данных по развертыванию информационных центров управления и абонентских пунктов непосредственно на мобильных объектах и в удаленных регионах.

Научная новизна: авторские математические модели реального поведения спутниковой сети с многостанционным случайным доступом и с частотно-кодовым разделением позволяют анализировать параметры помехозащищенности сети, проводить их оптимизацию и адаптацию параметров к изменениям внешних условий.

Практическая значимость: разработанные алгоритмы и программы реализованы соответствующими спецификациями для автоматизированного рабочего места оператора земной станции сетью «каждый с каждым».

РЕЗУЛЬТАТЫ

В главе «Анализ требований к сети спутниковой связи и разработка ее математической модели» (научно-исследовательская работа 2024 года «Системный анализ повышения эффективности систем спутниковой связи путем адаптации параметров») была представлена информационная модель требований корпора-

тивной сети [2]. В данной иерархической многоуровневой модели имеются вертикальные и горизонтальные информационные связи. Информационный обмен интенсивными потоками между элементами сети представлен различными формами информационного взаимодействия и различными видами представления информации. Для системных исследований в работе была выбрана существующая единая система спутниковой связи второго этапа (ЕССС-2). Ее характеристики: глобальный охват, высокая пропускная способность, помехозащищенность, стабильная защита от несанкционированного доступа. Система обеспечивает беспроводную связь [5, 9] со стационарными и с мобильными объектами. Математические модели поведения данной сети: режим работы «каждый с каждым», многостанционный доступ с кодовым разделением, предоставление каналов по требованию. В данных моделях необходимо учитывать параметры мощности и скорости передачи информационных сигналов земных станций. Полученные в результате математического моделирования расчеты по помехозащищенности, скорости передачи земных станций через прямой ствол ретранслятора и с обработкой сигналов на борту спутника описаны в [1, 4, 6, 10]. Были представлены зависимости от следующих параметров объектов: самого ретранслятора, среды распространения, других земных станций, работающих через данный ствол. Из-за значительного влияния временного фактора изменения параметров, а также для исключения случайных факторов при отсутствии системы регулирования в сети необходимо обеспечить значительный энергетический запас мощности земных станций. Тем самым снижается влияние случайных факторов на скорости передачи управляющей информации. Поэтому в моделях учитывались статические меры оптимизации параметров системы [3, 7], считая, что изменения параметров по времени намного меньше времени распространения сигнала до ретранслятора и обратно.

ВЫВОДЫ

Многофакторная энергетическая мощность ретрансляторов наземной станции при их работе в стволе с прямой ретрансляцией сигналов является наиболее сложной задачей регулирования мощности земных станций и скорости их работы в эффективной системе спутниковой связи. Решения данной задачи

представлены разработками НИР по обоснованию основных принципов адаптации параметров сети спутниковой связи в условиях прямой ретрансляции сигналов.

Список источников

1. Аббасова Т. С., Стрельцова Г. А. Методика расчета помехозащищенности направлений связи с прямой ретрансляцией сигналов // Эволюционные процессы информационных технологий : сборник научных статей 10-й Международной научно-технической конференции. Бургас : Изд-во ИГНЭТ, 2024. С. 3–10.
2. Дмитриенко Е. Н., Штрафина Е. Д. Анализ требований к современной сети спутниковой связи // Эволюционные процессы информационных технологий. Бургас : Изд-во ИГНЭТ, 2024. С.140–149.
3. Макарова Е. Г., Строганова, С. М. Моделирование оптимизации сети спутниковой связи по мощности передающих устройств земных станций при работе одной станции в стволе // Инновационные технологии : сборник научных статей 3-й Международной научно-технической конференции. Бургас : Изд-во ИГНЭТ, 2025. С. 73-81.
4. Стрельцова Г. А., Штрафина Е. Д. Адаптивная сеть спутниковой связи: основные особенности ее практической реализации // Информационные технологии. радиоэлектроника. телекоммуникации (ITRT-2024) : материалы XI Международной заочной научно-технической конференции. Тольятти : ПВГУС, 2025. С. 166–169.
5. Анализатор устройств беспроводной связи. URL: <https://aus@nt-rt.ru> (дата обращения 24.11.2024).
6. Артюшенко В. М. Анализ повышения помехозащищенности спутниковых в условиях преднамеренных активных помех // Современные информационные технологии : сборник статей 10-й Международной научно-технической конференции. Москва, 2024. С. 19–24.
7. Ковальский А. А. Организация адаптивного мультиплексирования трафика мультисервисных сетей в каналообразующей аппаратуре земных станций

спутниковой связи с учетом изменяющейся помеховой обстановки // Системы управления, связи и безопасности. 2017. № 1. С. 175–212.

8. Патент RU 2611606C1. Способ адаптации режимов передачи информации по спутниковым каналам связи в условиях воздействия атмосферных возмущений и устройство его реализующее : опубл. 28.02.2017 / А. А. Илюхин, А. В. Вдовин. URL: <https://patents.google.com/patent/RU2611606C1/ru> (дата обращения 24.11.2024).

9. Artushenko V. M., Abbasova T. S., Kuchеров B. A. Creating cellular networks in rural areas with the largest coverage area // Radioengineering. 2015. № 2. С. 76-82.

10. Артющенко В. М., Кучеров Б. А. Расчет помехозащищенности земных станций при обработке сигналов на борту спутника // Национальная ассоциация ученых (НАУ) : электронный журнал. 2014. № 2, ч. 3. С. 30–32. URL: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://national-science.ru/wp-content/uploads/2015/12/National_2_p3_6-149.pdf (дата обращения 24.11.2024).

**АНАЛИЗ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ СИГНАЛОВ
С ОРТОГОНАЛЬНЫМ ЧАСТОТНЫМ УПЛОТНЕНИЕМ (OFDM)
В УСЛОВИЯХ МНОГОЛУЧЕВОГО ЗАТУХАНИЯ**

СУЛТАНОВ Жаслан Асылбекович, студент
Омский государственный технический университет
644050, Россия, Омск, zaslansultanov3@gmail.com

НАЗАРУК Елена Маратовна, доцент
Омский государственный технический университет
644105, Россия, Омск, elmarnaz@mail.ru

ВОРОНЦОВ Андрей Михайлович, студент
Омский государственный технический университет
644105, Россия, Омск, amvorontsov@st.omgtu.ru

Аннотация. В работе рассматривается способность сигналов с ортогональных частотным уплотнением бороться с искажениями, возникающими при перемещении сигнала по нескольким путям одновременно – многолучевое затухание. Также была проанализирована причина устойчивости таких сигналов к помехам. Мы предлагаем простые способы улучшения работы сигналов в реальных условиях. Анализ показал, что с помощью циклического префикса можно сильно снизить ошибки при передаче данных.

Ключевые слова: ортогональное частотное уплотнение, OFDM, помехоустойчивость, многолучевое затухание, беспроводные сети, сигналы, телекоммуникации, искажения, циклический префикс, модели каналов.

**ANALYSIS OF NOISE IMMUNITY OF ORTHOGONAL
FREQUENCY DIVISION MULTIPLEXING (OFDM) SIGNALS
UNDER MULTIPATH FADING CONDITIONS**

SULTANOV Zhaslan Asylbekovich, student
Omsk State Technical University
644050, Russia, Omsk, zaslansultanov3@gmail.com

NAZARUK Elena Maratovna, Associate Professor
Omsk State Technical University
644105, Russia, Omsk, elmarnaz@mail.ru

Abstract. This paper examines the ability of signals with orthogonal frequency compression to combat distortions that occur when a signal travels along several paths simultaneously – multipath attenuation. The reason for the resistance of such signals to interference was also analyzed. We offer simple ways to improve signal performance in real-world conditions. The analysis showed that by using a cyclic prefix, errors in data transmission can be greatly reduced.

Keywords: orthogonal frequency division multiplexing, OFDM, noise immunity, multipath fading, wireless networks, signals, telecommunications, distortions, cyclic prefix, channel models.

ВВЕДЕНИЕ

В наше время беспроводные сети стали очень важной частью нашего быта [1]. Но в реальной жизни сигналы часто искажаются из-за столкновения их с различными препятствиями на пути. Они отражаются и приходят к получателю разными путями – это называется многолучевым затуханием. Оно вызывает помехи при наложении сигналов друг на друга [2].

Более распространенным способом борьбы с искажением сигналов является техника, при которой один поток данных делится на множество мелких потоков с различными частотами, из-за чего они не накладываются друг на друга – такие сигналы называются ортогональными (то есть их волны не пересекаются в ненужных местах) [3]. OFDM используется в 4G, 5G и Wi-Fi, потому что оно хорошо устраняет различные помехи [4].

РЕЗУЛЬТАТЫ

При проведении нашего исследования мы рассмотрели простую модель канала с многолучевым затуханием, где сигнал, прежде чем попасть к получателю, проходит через несколько путей [5]. Для OFDM ключевой фактор – это то, что каждый подканал можно изменять отдельно.

Основная проблема при применении данной техники с применением многолучевых каналов – это явления, когда задержанные копии сигнала мешают следующим. Чтобы этого избежать, в OFDM добавляют циклический префикс (кратко СР, это копия конца сигнала, вставленная в его начало, чтобы защитить от задержек) [6]. Длина СР должна быть больше максимальной задержки распространения. Обычно эта задержка составляет 1–5 микросекунд. Для OFDM с расстоянием между подканалами (кратко – SCS, это промежуток между частотами подканалов) 15 кГц длительность одного символа данных равна примерно 66,7 микросекунд, так что СР длиной 4,7 микросекунд обычно хватает, но в некоторых случаях лучше взять 16,7 микросекунд [1].

Еще один важный фактор – доплеровский сдвиг – это изменение частоты сигнала из-за движения отправителя или получателя [7]. Формула для сдвига:

$f_d = \frac{v}{c} \times f_c \times \cos(\theta)$, где V – скорость движения, C – скорость света (3×10^8 м/с), f_c – основная частота сигнала, θ – угол направления. Для основной частоты 2 ГГц и скорости 100 км/ч максимальный сдвиг получается около 185 Гц. Если этот сдвиг превышает 10–15% от SCS, то возникает наложение частот друг на друга [8]. Если ничего не предпринять, вероятность ошибки в битах может вырасти в 2+ раза.

В теории, в канале, где сигнал угасает из-за многолучевого распространения без прямой видимости вероятности ошибки в битах для OFDM с простым процессом изменения одного или нескольких характеристик сигнала, чтобы передать информацию по типу бинарной фазовой манипуляции, рассчитывается как

$$BER \approx \frac{1}{2} \times \left(1 - \sqrt{\frac{SNR}{(1+SNR)}} \right), \text{ где SNR – отношение сигнала к шуму (это по-}$$

казатель, насколько сигнал сильнее помех). Для SNR равного 10 – BER равно примерно 0,02, не учитывая дополнительных помех, но с доплеровским сдвигом оно может увеличиться до 0,05–0,1 [6]. С циклическим префиксом и исправлением сдвига шанс ошибки снижается до 0,001. В реальных сетях OFDM показывает себя лучше, чем прежние методы, когда каналы делятся по времени. Но есть

минусы: если задержки слишком большие, префикса может не хватить, и тогда нужны дополнительные способы борьбы с помехами [9].

ВЫВОДЫ

В итоге наш анализ подтверждает, что сигналы OFDM довольно хорошо борются с помехами в условиях многолучевого затухания. Благодаря разделению на ортогональные подканалы и использованию циклического префикса [10] мы увидели, что простые изменения, вроде исправления доплеровского сдвига, помогают снизить ошибки в 10–100 раз. Это делает OFDM хорошим вариантом для современных беспроводных систем. Исследование подтверждает ценность OFDM в повседневных технологиях, как 5G, где надежная передача данных очень важна [5].

Список источников

1. Сухоребров В. Г. Основы построения инфокоммуникационных систем и сетей : учебное пособие. Нижний Новгород : НГТУ им. Р. Е. Алексеева, 2023. 149 с.
2. Электродинамика и распространение радиоволн : учебное пособие. Часть 3 : Распространение радиоволн. Севастополь : СевГУ, 2025. 57 с. ISBN 978-5-6054443-2-9.
3. Колодезная Г. В. Теоретические основы систем мобильной связи : учебное пособие. Хабаровск : ДВГУПС, 2021. 76 с.
4. Буснюк Н. Н., Мельянец Г. И. Системы мобильной связи. 2-е изд., стер. Санкт-Петербург : Лань, 2023. 128 с. ISBN 978-5- 507-46238-4.
5. Инновации и научно-техническое творчество молодежи : материалы Российской научно-технической конференции. Новосибирск : СибГУТИ, 2022. 1323 с. ISBN 978-5-91434-072-5.
6. Лисничук А. А. Многокритериальный синтез радиосигналов с прямым расширением спектра : учебное пособие. Рязань : РГРТУ, 2023. 112 с.
7. Солдатов А. И. Изучение доплеровского датчика скорости передвижения : методические указания. Москва : ТУСУР, 2023. 29 с.

8. Основы спутниковой связи : учебно-методическое пособие / составитель И. Ю. Сухорукова. Москва : МТУСИ, 2024. 35 с.
9. Гизатуллин З. М. Современные проблемы информатики и вычислительной техники : учебное пособие. Казань : КНИТУ-КАИ, 2021. 108 с.
10. VI научный форум «Телекоммуникации: теория и технологии» ТТТ-2023 : Материалы XXV Международной научно-технической конференции, Казань, 22–24 ноября 2023 года. Т. 1. Казань, 2023. 594 с. ISBN 978-5-7579-2687-2.

РЕШЕНИЕ ВНУТРЕННЕЙ ЗАДАЧИ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ МЕТОДОМ АППРОКСИМАЦИИ СОБСТВЕННЫХ ФУНКЦИЙ

ТАБАКОВ Дмитрий Петрович, доктор физико-математических наук,
доцент, заведующий кафедрой физики
*Поволжский государственный университет
телекоммуникаций и информатики*
443010, Россия, Самара, illuminator84@yandex.ru

МАЙОРОВ Андрей Геннадьевич, кандидат физико-математических
наук, доцент кафедры физики
*Поволжский государственный университет
телекоммуникаций и информатики*
443010, Россия, Самара, a.mayorov@psuti.ru

Аннотация. Рассмотрена задача построения аппроксимационных моделей излучающих и переизлучающих структур на основе метода собственных функций. Отмечена неоднозначность решения этой задачи. Предложены методики, предполагающие возможность использования их для синтеза аппроксимационных моделей. Произведены оценки погрешности, вносимой аппроксимационной моделью. В качестве примера приведен один из возможных вариантов построения аппроксимационной модели для трубчатой антенны. Представлены результаты численного моделирования.

Ключевые слова: метод собственных функций, метод моментов, сингулярные интегральные уравнения, аппроксимационная модель, трубчатая антенна.

SOLVING THE INTERNAL PROBLEM OF ELECTRODYNAMICS BY THE METHOD OF APPROXIMATION OF EIGENFUNCTIONS

TABAKOV Dmitry Petrovich, Doctor of Physical and Mathematical
Sciences, Associate Professor, head at the Department of Physics
Volga Region State University of Telecommunications and Informatics
443010, Russia, Samara, illuminator84@yandex.ru

MAYOROV Andrey Gennadievich, Candidate of Physical and Mathematical
Sciences, Associate Professor at the Department of Physics

Abstract. The problem of constructing approximation models of radiating and reradiating structures based on the eigenfunction method is considered. The ambiguity of the solution of this problem is noticed. Techniques are proposed which can be used in developing approximation models. An expression is presented for estimating the error introduced by the approximation model. As an example, one of the possible options for constructing an approximation model for a tubular antenna is given. The results of numerical simulation are presented.

Keywords: method of eigenfunctions, method of moments, singular integral equations, approximation model, tubular antenna.

ВВЕДЕНИЕ

Системы автоматического проектирования (САПР) нашли самое широкое применение в решении задач электродинамического анализа антенн и задачах дифракции. Основным методом, который применяется в подобных системах, является метод конечных элементов [1]. Чаще всего при применении метода моментов [2] электродинамическая задача может быть сведена к системе линейных алгебраических уравнений (СЛАУ). Сложность вычислительной процедуры для ЭВМ при вычислении СЛАУ увеличивается как N^3 , что требует существенных вычислительных ресурсов. При использовании метода моментов размерность N целесообразно уменьшать до возможного минимума путем применения оптимальных проекционных функций. Наиболее оптимальной системой проекционных функций (СПФ) является набор функций, позволяющий привести матрицу метода моментов (матрицу импедансов) к диагональному виду. В работах [3, 4] авторами сделаны удачные попытки вычисления оптимальных проекционных функций, которые были названы характеристическими модами. В работе [5] были продемонстрированы возможности метода собственных функций (МСФ) при решении данной проблемы. Там же продемонстрировано использование МСФ для синтеза аппроксимационных моделей (АМ) для решения задач электродинамики по

поиску распределения токов на поверхности антенны. В текущей работе предлагаются некоторые доработки АМ, которые могут значительно повысить ее эффективность.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Будем рассматривать в качестве примера использования АМ трубчатую антенну. Задача по определению токовой функции обычно сводится к интегральному уравнению (ИУ), которое всегда можно записать в операторном виде:

$$A(M)u = v. \quad (1)$$

В данной записи, A – интегральный оператор с ядром M , с правой частью в виде функции v . В методе собственных функций производится представление решения уравнения (1) в виде суммы аппроксимированного решения u' и ее остатка r :

$$u = u' + r, \quad u' = \sum_{j=1}^N u'_j \varphi_j, \\ u'_j \in U' = W'V, \quad W' = (JX^{-1}J^T)'. \quad (2)$$

Здесь U' – аппроксимированное решение СЛАУ метода моментов $MU = V$. При этом J и X матрицы собственных функций (СФ) и собственных значений (СЗ). Таким образом, задача на собственные значения может быть представлена в матричном виде $MJ = XJ$, где матрица J – матрица проекционных функции φ_j метода моментов, а X – диагональная матрица для M , P – число, показывающее порядок усеченных матриц ($j = 1 \dots P, \quad P < N$). Усечение увеличивает ошибку r на заданную приемлемую величину. Введем точку $p = [x, \gamma_1, \gamma_2 \dots]$ из области аппроксимации A . Параметрами аппроксимации является прежде всего нормированная длина антенны $x = L/\lambda$ и остальные параметры геометрии антенны γ_1, γ_2 . Матрицы X, J являются гладкими функциями параметров p . Их аппроксимации X'', J'' (полиномиальная аппроксимация СЗ и СФ) для различных p позволяют получать решение без вычислений СЛАУ. Некоторые результаты

работы над синтезом аппроксимационных полиномов представлены в работе [5]. Погрешность аппроксимации ρ_A предлагается оценивать следующей формулой:

$$\rho_A = \rho_A(\mathbf{p}) = \frac{|\mathbf{W}''\mathbf{M}' - \mathbf{I}^*|}{|\mathbf{I}^*|}, \quad \mathbf{W}'' = (\mathbf{J}\mathbf{X}^{-1}\mathbf{J}^T)'',$$

$$\mathbf{M}' = (\mathbf{J}\mathbf{X}\mathbf{J}^T)', \quad (\mathbf{J}\mathbf{J}^T)' = \mathbf{I}^*. \quad (3)$$

Аппроксимации $\mathbf{J}''$ и $\mathbf{X}''$ выполняются из массивов СВ $\{j\}$ и СЗ $\{\xi\}$, т.е. из $\mathbf{J}'$ и $\mathbf{X}'$ вычисленных в различных точках $\mathbf{p} \in A$. Восстановление $\mathbf{J}'$ и $\mathbf{X}'$ может быть выполнено комбинацией линейной интерполяции и сплайн-интерполяции. Матрицы $\mathbf{J}'$ и $\mathbf{X}'$ обладают большой размерностью, поэтому аппроксимационная модель предполагает использование алгоритмов, производящих восстановить $\{j\}$ и $\{\xi\}$ из гораздо более сжатых базовых массивов $\{j^*\}$ и $\{\xi^*\}$. Необходимо, чтобы $\{j^*\}$ и $\{\xi^*\}$ позволяли произвести подобное уплотнение без потери точности восстановления $\{j\}$ и $\{\xi\}$. В работах [6, 7] продемонстрировано, что зависимость элементов СЗ и СФ от параметра длины антенны хорошо аппроксимируется разложением на полиномы 3 порядка.

Продemonстрируем применение АМ для трубчатой вибраторной антенны (рис. 1), задачу по поиску токовой функции (внутренняя задача), а так же внешняя электродинамическая задача которой рассмотрена в работе [8].

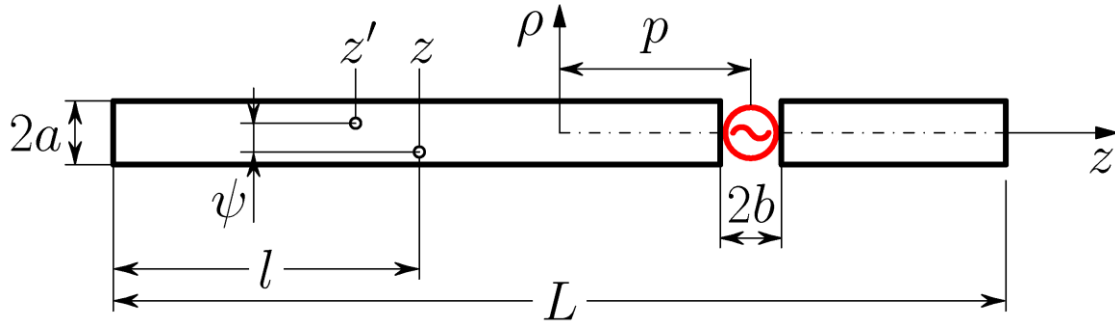


Рис. 1. Общий вид рассматриваемой структуры

Внутренняя задача представляет собой ИУ вида (1), при этом $u = \eta(z)$ – токовая функция вдоль оси антенны, что подлежит вычислению, а $v = E_z^{ext}(z)$ – компонента внешнего поля вдоль оси. Расчеты производились в пространстве двух геометрических параметров $x = L/\lambda$ и $\gamma = a/L$, т. е. $\mathbf{p} = [x, \gamma]$. Дискретизация произведена на сегменты равной длины, в качестве базовых и

тестовых функций метода моментов были использованы суперпозиции кусочно-постоянных функций и дельта-функций.

АМ построена с использованием следующих параметров: $N = 300$, $P = 25$, $2b/L = 0.01$, $x \in \{10^{-3}; 2.5\}$, $\gamma \in \{1 \cdot 10^{-4}; 10^{-1}\}$.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты расчета погрешности аппроксимации по формуле (3) показаны на рис. 2. Решение, полученное двумя способами, представлено на рис. 3., при этом приведен случай с наихудшей невязкой.

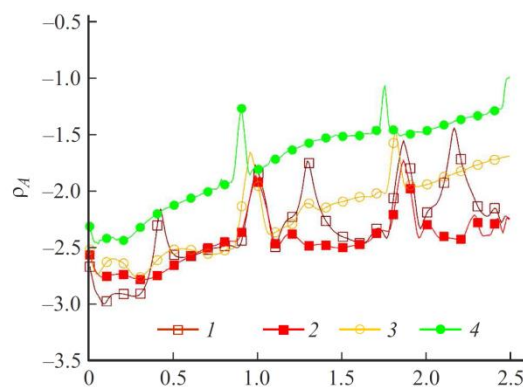


Рис. 2. Погрешность аппроксимации при росте параметра x , вычисляемая согласно формулам (3); 1– $\gamma = 1,875 \cdot 10^{-4}$; 2– $\gamma = 9,375 \cdot 10^{-4}$; 3– $\gamma = 9,375 \cdot 10^{-3}$, 4– $\gamma = 9,375 \cdot 10^{-2}$

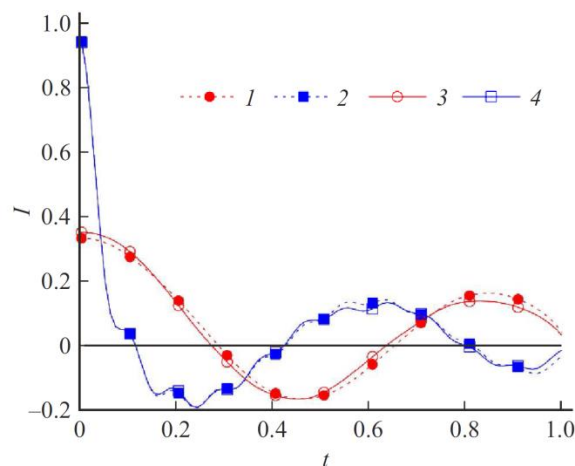


Рис. 3. Распределение тока, полученного разными способами ($I' = \eta'/\eta_{\max}$ – решение СЛАУ при $x = 2,5$, $\gamma = 0,09375$, распределение $I'' = \eta''/\eta_{\max}$, получено из аппроксимационной модели). Красным обозначены действительные части решений

ВЫВОДЫ

В статье представлен вариант построения АМ для хорошо изученной трубчатой антенны, позволяющей получать приближенное решение без вычислений СЛАУ, на любой частоте и при любых учтенных в модели геометриях антенны. Данная АМ может применяться для вычисления сложных антенных систем. В частности не составляет труда произвести расчет антенны Уда-Яги, что представляется авторам предметом дальнейших расчетов и совершенствования АМ. Тем не менее применение АМ сопровождается рядом недостатков. В частности, отказ от рассмотрения матриц импедансов и оперирование одними лишь коэффициентами аппроксимации, хранящимися в массивах данных АМ, неизбежно приводит к потере физического смысла массивов. Изучению экстремумов, асимптотик, особых точек в области аппроксимации и их влияния на характер решения посвящены работы [6, 7]. Данную информацию, а также возможные физические эффекты необходимо включить в массивы данных АМ.

Список источников

1. Gallagher R. H. Finite element analysis. Fundamentals. Englewood Cliffs (N. J.) : Prentice-Hall 1975. 420 p.
2. Harrington R. F. Field Computation by Moment Method. New York : Macmillan, 1968. 150 p.
3. Harrington R., Mautz J. Theory of characteristic modes for conducting bodies. DOI:10.1109/TAP.1971.1139999 // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1971. Vol. 19, iss. 5. P. 622–628.
4. Harrington R. F. Field Computation by Moment Method. New York : Macmillan, 1968. 150 p.
5. Табаков Д. П. Об описании излучения и дифракции электромагнитных волн методом собственных функций. DOI: 10.1007/s11141-021-10120-9 // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. 2021. Т. 64, № 3. С. 179–191.

6. Табаков Д. П., Майоров, А. Г. Аппроксимация решения внутренней электродинамической задачи для тонкого трубчатого вибратора методом собственных функций. DOI:10.31854/1813-324X-2019-5-4-58-64 // Труды учебных заведений связи. 2019. Т. 5, № 4. С. 58–64.

7. Табаков Д. П., Майоров А. Г. О собственных значениях интегрального оператора сингулярного интегрального уравнения тонкого трубчатого вибратора. DOI: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2019.22.1.26-31> // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2019. Т. 22, № 1. С. 26–31.

8. Неганов В. А. Физическая регуляризация некорректных задач электродинамики. Москва : Сайнс-Пресс, 2008. 431 с. ISBN 978-5-88070-161-2.

РЕШЕНИЕ ВНУТРЕННЕЙ И ВНЕШНЕЙ ЗАДАЧ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ ДЛЯ МНОВИТКОВОЙ ТОНКОПРОВОЛОЧНОЙ РАМКИ

ТАБАКОВ Дмитрий Петрович, доктор физико-математических наук,
доцент, заведующий кафедрой физики

*Поволжский государственный университет
телекоммуникаций и информатики
443010, Россия, Самара, illuminator84@yandex.ru*

НИКОЛАЕВА Кристина Богдановна, аспирант,
ассистент кафедры физики

*Поволжский государственный университет
телекоммуникаций и информатики
443010, Россия, Самара, kristinatsebrik@mail.ru*

Аннотация. Предложена модель мновитковой тонкопроводочной рамки, построенная в рамках тонкопроводочного приближения на основе интегральных представлений электромагнитного поля. Внутренняя задача сформулирована в виде интегрального уравнения Фредгольма первого рода. Решение внутренней задачи осуществлялось методом моментов. Приведены результаты численного моделирования. Отмечены особенности токовой функции и рассеянных структурой электромагнитных полей.

Ключевые слова: мновитковая рамка, интегральное уравнение Фредгольма первого рода, интегральное представление электромагнитного поля, метод моментов.

SOLUTION OF INTERNAL AND EXTERNAL ELECTRODYNAMICS PROBLEMS FOR A MULTI-TURN THIN-WIRE FRAME

TABAKOV Dmitry Petrovich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences,
Associate Professor, head at the Department of Physics

*Volga Region State University of Telecommunications and Informatics
443010, Russia, Samara, illuminator84@yandex.ru*

NIKOLAEVA Kristina Bogdanovna, PhD student,
Assistant at the Department of Physics

*Volga Region State University of Telecommunications and Informatics
443010, Russia, Samara, kristinatsebrik@mail.ru*

Abstract. A model of a multi-turn thin-wire coil is proposed, constructed within the thin-wire approximation based on integral representations of the electromagnetic field. The internal problem is formulated as a Fredholm integral equation of the first kind. The internal problem is solved using the method of moments. Results of numerical simulation are presented. Features of the current function and electromagnetic fields scattered by the structure are highlighted.

Keywords: multi-turn coil, Fredholm integral equation of the first kind, integral representation of the electromagnetic field, method of moments.

ВВЕДЕНИЕ

Проволочные рамки широко применяются при создании излучающих структур [1] и метаматериалов [2], полный электродинамический анализ которых предполагает решение сначала внутренней, а затем внешней задачи электродинамики. Внутренняя задача заключается в вычислении распределения тока по поверхности проводника при заданной конфигурации стороннего электрического поля. В рамках внешней задачи предполагается определение электромагнитных полей в любой точке пространства от вычисленного ранее распределения тока. Следует отметить, что в настоящее время в литературе строгие математические модели многовитковых рамок, по сути, не представлены. При этом наиболее часто встречающимся объектом подобного рода является кольцевая рамка в различных вариантах исполнения (плоская, цилиндрическая, тонкопроволочная и т. д. [1]). Некоторые модели, в том числе модель эллиптической рамки, были разработаны и исследованы одним из авторов данного доклада [3–5]. В [6] рассмотрена задача дифракции плоской электромагнитной волны на метке радиочастотной идентификации, представляющей собой совокупность кольцевых рамок с общим центром, лежащих в одной плоскости. Отметим также, что результаты расчета одновитковых рамок часто экстраполируются без особого обоснования на многозаходные варианты. Такой подход может быть оправдан лишь в дальней зоне излученного либо рассеянного поля, при этом определить корректно

ближние поля, входное сопротивление и резонансные частоты в режиме излучения, когда структура возбуждается точечным источником ЭДС, не представляется возможным. На наш взгляд, это является существенным пробелом в теории рамочных излучающих и переизлучающих структур, и построение строгих математических моделей многовитковых рамочных структур представляется довольно актуальной задачей.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

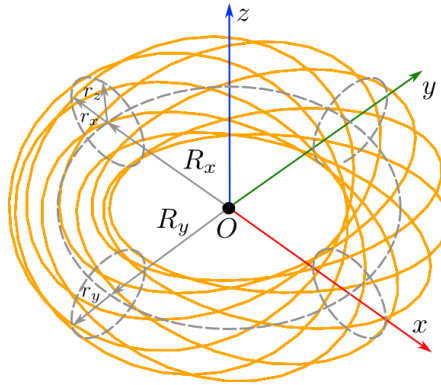


Рис. 1. Геометрия многовитковой рамки

Многовитковая рамка (МР) (рис. 1) – это единый проводник L радиуса ε , уравнение образующей которого имеет вид:

$$\begin{aligned} L: \mathbf{r}(t) &= \hat{\mathbf{x}}X(t) + \hat{\mathbf{y}}Y(t) + \hat{\mathbf{z}}Z(t), t \in [0; 2\pi]; \\ X(t) &= r_x \sin(t) + R_x \sin((N-1)t); \\ Y(t) &= r_y \cos(t) + R_y \cos((N-1)t); \\ Z(t) &= r_z \sin(sNt). \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь t – параметр, R_x и R_y – полуоси эллипса (усредненной образующей МР); r_x, r_y, r_z – полуоси эллипсов, ограничивающих область с проводником L ; N – число витков проводника, $s \pm 1$ определяет направление (правое либо левое) намотки проводника. Семь приведенных параметров обеспечивают широкие возможности модификации геометрии МР. Из выражений (1) следует, что образующая проводника L располагается в области S , представляющей собой поверхность трубки с нерегулярным поперечным сечением. Проводник МР имеет бесконечно большую проводимость и малые поперечные размеры ($\varepsilon \ll r_x, r_y, r_z, \lambda$, где λ – длина волны), в результате чего структуру целесообразно

рассматривать в рамках тонкопроволочного приближения, используя интегральное представление электромагнитного поля (ИП ЭМП) вида [7]:

$$\mathbf{F}(\mathbf{r}) = \int_L I(l) \mathbf{K}^{(F)}(\mathbf{r}, \mathbf{r}(l)) dl, \quad F \equiv E, H; \quad (2)$$

в котором $I(l)$ – распределение полного тока по образующей L , l – естественный параметр на образующей, $\mathbf{r}$ – радиус-вектор точки наблюдения, $\mathbf{r}(l)$ – уравнение образующей (1), приведенное к натуральному параметру, $\mathbf{K}^{(E,H)}$ – ядра ИП ЭМП. На образующей L имеет место выполнение граничного условия:

$$(\mathbf{E}^{in}(\mathbf{r}(l)) + \mathbf{E}(\mathbf{r}(l))) \cdot \hat{\mathbf{I}}(l) = 0, \quad (3)$$

в котором $\mathbf{E}^{in}$ – электрическая компонента ЭМП, создаваемая сторонними источниками, $\hat{\mathbf{I}}(l) = d\mathbf{r}(l)/dl$ – единичный вектор касательной, определенный в точке l на образующей L . Подставляя в (3) ИП ЭМП(2), получаем ИУ для МР:

$$\int_L I(l') M(l, l') dl' = E(l), \quad l \in L. \quad (4)$$

в котором

$$E(l) = \hat{\mathbf{I}}(l) \cdot \mathbf{E}^{in}(\mathbf{r}(l)), \quad M(l, l') = -\hat{\mathbf{I}}(l) \cdot \mathbf{K}^{(E)}(\mathbf{r}(l), \mathbf{r}(l')),$$

соответственно, правая часть ИУ, определяющаяся вектором стороннего электрического поля, и ядро ИУ. Таким образом, внешняя электродинамическая задача для МР формулируется в виде выражения (2), а внутренняя задача – в виде выражения (4). Решение ИУ (4) осуществляется методом моментов [8], где в качестве базисных используются кусочно-постоянные функции, а в качестве тестовых – дельта-функции.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В данной работе рассмотрен случай возбуждения МР плоской электромагнитной волной (ПЭМВ), при этом выражение для стороннего электрического поля приобретает вид:

$$\mathbf{E}^{in}(\mathbf{r}) = \hat{\mathbf{p}} E_0 \exp(-i\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}),$$

здесь $\hat{\mathbf{p}}$ – единичный вектор поляризации, E_0 – амплитуда электрического поля ПЭМВ, $\mathbf{k} = k\hat{\mathbf{k}}$ – волновой вектор, $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число, $\hat{\mathbf{k}}$ – единичный волновой вектор, задающий направление распространения ПЭМВ. Расчеты были

проведены для кольцевой МР ($R_x = R_y = R$), падающей против оси OZ ($\hat{\mathbf{k}} = -\hat{\mathbf{z}}$) и поляризованной вдоль оси OX ($\hat{\mathbf{p}} = \hat{\mathbf{x}}$). Численное моделирование осуществлялось для различных отношений R/λ . При этом полагалось, что $r_x = r_y = r_z = r$, $r/R = 0.3$, $\varepsilon/r_{max} = 10^{-3}$, $N = 10$, $s = 1$. Проведен анализ распределений тока и нормированных диаграмм рассеяния (ДР). Результаты расчетов показаны на рис. 2, 3. Распределения тока (рис. 2) имеют довольно сложную структуру, не характерную для одновитковых рамок. Анализ ДР (рис. 3) показал, что даже на значительном удалении от структуры поле МР при малых R/λ имеет существенную реактивную составляющую.

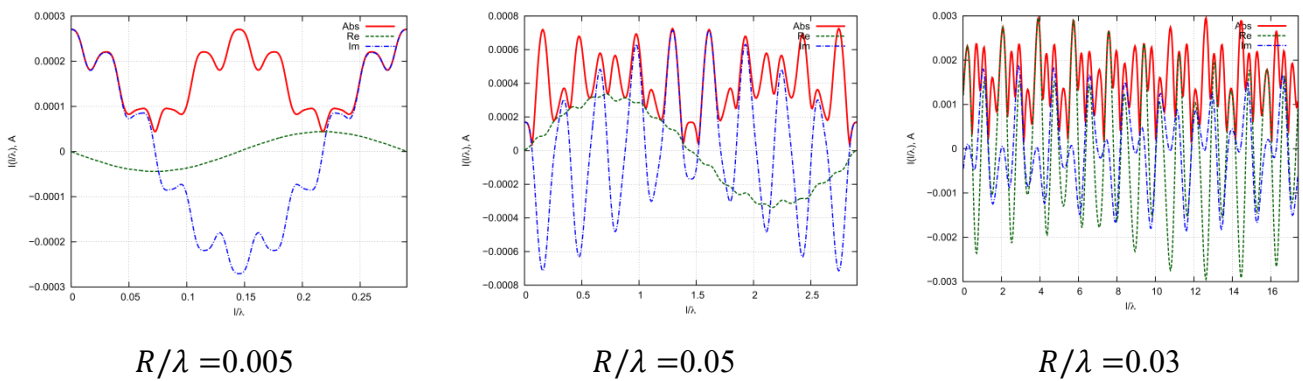


Рис. 2. Комплексные распределения тока по проводнику

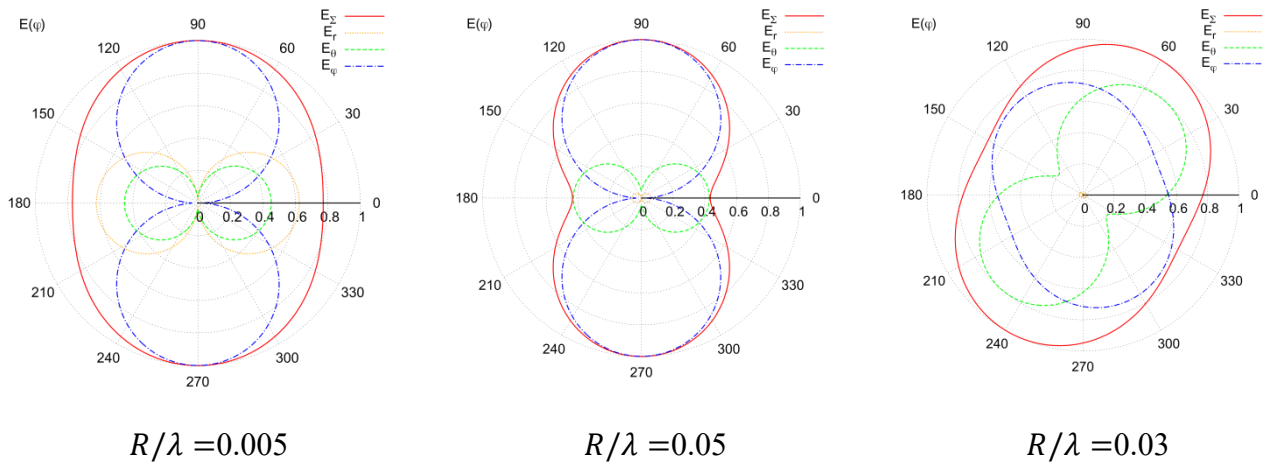


Рис. 3. Нормированные ДР в азимутальной плоскости

ВЫВОДЫ

Таким образом, в работе предложена математическая модель многовитковой рамки, с помощью которой был произведен расчет ее электродинамических характеристик. Следует отметить что данная модель во многом является пробной. Дальнейшее ее совершенствование авторы связывают

с использованием в качестве базисных функций собственных функций [9] интегрального оператора ИУ (4), исследованием их резонансных свойств и устойчивости форм к изменению длины волны, а также с введением в модель эквивалентных поверхностных токов, целесообразность использования которых представляется очевидной при плотной намотке проводника. Предложенная модель может рассматриваться в качестве варианта рамочной антенны, компонента фазированных антенных решеток, а также либо качестве ключевого элемента киральных структур [2]. Существенная длина проводника МР, являющегося к тому же замкнутым, создает предпосылки для появления интересных эффектов в структурах, построенных на основе МР.

Список источников

1. Неганов В. А., Ключев Д. С., Табаков Д. П. Устройства СВЧ и антенны. Ч. II. Теория и техника антенн / под ред. В. А. Неганова. Москва : Ленанд, 2024. 728 с. ISBN 978-5-9710-6988-1.
2. Неганов В. А., Осипов О. В. Отражающие, волноведущие и излучающие структуры с киральными элементами. Москва : Радио и связь, 2006. 279 с. ISBN 5-256-01811-6.
3. Неганов В. А., Табаков Д. П. Задача о распределении поверхностной плотности тока по кольцевой полосковой антенне // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2007. Т. 10, № 4. С. 8–19.
4. Неганов В. А., Табаков Д. П. Применение сингулярных интегральных уравнений для электродинамического анализа плоской кольцевой антенны // Антенны. 2008. № 10. С. 25–33.
5. Табаков Д. П., Майоров А. Г. Спектральные характеристики интегрального оператора внутренней задачи электродинамики для эллиптической рамочной структуры // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2023. Т. 26, № 1. С. 58–69.
6. Neganov V. A., Plotnikov A. M., Tabakov D. P. Electrodynamics analysis of resonance tags for radio-frequency identification of objects based on the method of

singular integral equations // Journal of Communications Technology and Electronics. 2012. Vol. 57, Iss. 7. P. 674-681.

7. Табаков Д. П., Майоров А. Г. Метод собственных функций в теории тонкопроволочной структуры. DOI: <https://doi.org/10.18127/j00338486-202508-10> // Радиотехника. 2025. Т. 89, № 8. С. 75–88.

8. Harrington R. F. Field Computation by Moment Method. New York : Macmillan, 1968. 150 p.

9. Табаков Д. П. Об описании излучения и дифракции электромагнитных волн методом собственных функций // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. 2021. Т. 64, № 3. С. 179–191.

МОДУЛЬНАЯ АРХИТЕКТУРА ПРИКЛАДНОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ: СТРУКТУРА, ФУНКЦИИ И ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ В РОССИИ В 2025 ГОДУ

ТОЛКАЧЕВ Федор Андреевич, аспирант

*Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза,
летчика-космонавта А. А. Леонова – филиал ФГБОУ ВО «МИИГАиК»
141074, Россия, г. Королев, zkiller983@gmail.com*

МЯЧИН Дмитрий Владимирович, аспирант

*Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза,
летчика-космонавта А. А. Леонова – филиал ФГБОУ ВО «МИИГАиК»
141074, Россия, г. Королев, dmitri21777@gmail.com*

ШУЛЬЖЕНКО Сергей Николаевич, доктор технических наук,
профессор

*Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза,
летчика-космонавта А. А. Леонова – филиал ФГБОУ ВО «МИИГАиК»
141074, Россия, г. Королев, shulzh79@mail.ru*

Аннотация. В статье рассматриваются современные тенденции развития модульной архитектуры прикладного ПО в России в 2025 году с акцентом на классификацию модулей (управляющие, обслуживающие, обрабатывающие), их функциональное назначение и роль в обеспечении импортозамещения. Анализируются ключевые технологические тренды: микросервисная архитектура, облачные решения и ИИ. Выявлены основные проблемы развития отечественного ПО и предложены пути их решения.

Ключевые слова: модульная архитектура, управляющие модули, обслуживающие модули, обрабатывающие модули, микросервисы, импортозамещение, безопасность, цифровая трансформация, Россия, 2025.

**MODULAR ARCHITECTURE OF APPLICATION SOFTWARE:
STRUCTURE, FUNCTIONS AND DEVELOPMENT TRENDS
IN RUSSIA IN 2025**

TOLKACHEV Fyodor Andreevich, PhD student
*Technological University named after twice Hero of the Soviet Union,
pilot-cosmonaut A. A. Leonov – branch of FSBEI HE MIIGAiK
141074, Russia, Korolev, zkiller983@gmail.com*

MYACHIN Dmitry Vladimirovich, PhD student
*Technological University named after twice Hero of the Soviet Union,
pilot-cosmonaut A. A. Leonov – branch of FSBEI HE MIIGAiK
141074, Russia, Korolev, dmitri21777@gmail.com*

SHULZHENKO Sergey Nikolaevich, Doctor of Engineering Sciences,
professor
*Technological University named after twice Hero of the Soviet Union,
pilot-cosmonaut A. A. Leonov – branch of FSBEI HE MIIGAiK
141074, Russia, Korolev, shulzh79@mail.ru*

Abstract. The article examines modern trends in the development of modular architecture of application software in Russia in 2025, focusing on the classification of modules (control, service, processing), their functional purpose and role in ensuring import substitution. Key technological trends are analyzed: microservice architecture, cloud solutions and AI. The main problems of domestic software development are identified and ways to solve them are proposed.

Keywords: modular architecture, control modules, service modules, processing modules, microservices, import substitution, security, digital transformation, Russia, 2025.

ВВЕДЕНИЕ

Современная модульная архитектура ПО перестала быть техническим выбором, превратившись в стратегическую основу национальной ИТ-политики России. Курс на технологический суверенитет, закрепленный в программе «Цифровая экономика РФ» и постановлении Правительства № 1236 от 16.12.2015 о запрете иностранного ПО в госсекторе, делает модульность ключевым инструментом импортозамещения.

Сущность модульной архитектуры заключается в декомпозиции системы на независимые компоненты, что снижает сложность и упрощает сопровождение. В российских проектах четко выделяются три типа модулей:

Структурные принципы и функциональное разделение модулей (табл. 1)

Управляющие модули выполняют координацию системы, маршрутизацию запросов и контроль доступа. В 2025 году они реализуются как API-шлюзы и Service Mesh. Критически важно их соответствие требованиям ФСТЭК и ФСБ, что делает платформы типа Astra Linux Special Edition предпочтительными решениями. Эта ОС, разработанная «Группой Астра», включает средства защиты информации (СЗИ) и поддерживает сценарии от серверных до встраиваемых систем.

Таблица 1

Структурные принципы и функциональное разделение модулей

Тип модуля	Основные функции	Технологические реализации	Примеры в российском ПО
Управляющие	Координация работы системы, маршрутизация запросов, контроль доступа	API Gateway, Service Mesh, ESB	Astra Linux SE, «Сфера» (модуль управления доступом)
Обслуживающие	Логирование, мониторинг, резервное копирование, автоматизация развертывания	Системы CI/CD, платформы мониторинга	«КуберНетПро», Zabbix, «Сфера» (DevOps-инструменты)
Обрабатывающие	Выполнение бизнес-логики: расчеты, анализ данных, обработка транзакций	AI/ML-фреймворки, системы обработки больших данных	SberAI, Yadro AI Cloud, «1С:Предприятие 8»

Обслуживающие модули обеспечивают бесперебойную работу системы через логирование, мониторинг, резервное копирование и автоматизацию развертывания. В России активно развиваются отечественные аналоги решений с открытым кодом: «КуберНетПро» (оркестратор контейнеров) и «Сфера» (платформа DevOps-автоматизации).

Обрабатывающие модули выполняют бизнес-логику: расчеты, анализ данных, обработку транзакций. В 2025 году они активно интегрируются с ИИ-

технологиями. Национальные платформы SberAI и Yadro AI Cloud предоставляют инструменты для создания и развертывания ИИ-решений на отечественной инфраструктуре.

Ключевой технологической тенденцией 2025 года является массовое внедрение микросервисной архитектуры. Она позволяет создавать гибкие системы, где каждый сервис отвечает за конкретную бизнес-функцию и может разрабатываться независимо. Это особенно важно для критически важных секторов: банковской сферы, телекоммуникаций, государственного управления.

Таблица 2

Сравнительные архитектурных подходов

Критерий сравнения	Монолитная архитектура	Модульная архитектура	Микросервисная архитектура
Масштабируемость	Низкая (требуется масштабирования всей системы)	Средняя (масштабирование отдельных модулей)	Высокая (независимое масштабирование сервисов)
Отказоустойчивость	Низкая (сбой одного компонента останавливает всю систему)	Средняя (отказ отдельных модулей)	Высокая (изоляция сбоев)
Скорость разработки	Низкая (сложная координация команд)	Средняя (умеренная координация)	Высокая (независимые команды)
Соответствие требованиям безопасности	Высокая (единая точка контроля)	Высокая (разделение ответственности)	Средняя (сложность контроля множества точек)
Импортозависимость	Высокая (полная зависимость от технологического стека)	Средняя (возможность частичного замещения)	Низкая (возможность замещения отдельных сервисов)
Доля на российском рынке (2025)	35% (преимущественно legacy-системы)	40% (основной тренд для госсектора)	25% (быстрорастущий сегмент)

Развитие микросервисов невозможно без отечественной облачной инфраструктуры. Компании вроде YADRO создают специализированные решения (Yadro AI Cloud) для задач ИИ и обработки больших данных. Это позволяет разработчикам создавать и развертывать приложения на российской инфраструктуре, что является ключевым элементом технологического суверенитета.

Таблица 3

Российские программные платформы для модульной архитектуры

Платформа	Разработчик	Назначение	Особенности	Степень импортозамещения
Astra Linux Special Edition	«Группа Астра»	Операционная система для управляющих модулей	Сертифицирована ФСТЭК, включает СЗИ, поддержка отечественного оборудования	95%
SberAI	Сбербанк	Платформа для ИИ и ML в обрабатывающих модулях	Набор готовых моделей, конструктор для создания своих решений	70%
Yadro AI Cloud	YADRO	Облачная инфраструктура для НРС и ИИ	Оптимизирована под российское оборудование, интеграция с Astra Linux	80%
КуберНетПро	НИИ «Восход»	Оркестратор контейнеров для микросервисов	Полный аналог Kubernetes с улучшенной безопасностью	90%
Сфера	Ростех	Платформа для DevOps-автоматизации	Инструменты CI/CD, мониторинг, управление конфигурациями	75%

Несмотря на прогресс, отечественная ИТ-индустрия сталкивается с проблемами:

Таблица 4

Проблемы развития отечественной ИТ-индустрии и пути их решения

Дефицит квалифицированных кадров	Недостаточная подготовка в вузах, утечка мозгов за рубеж	• Программы «Астра-карьера»	3-5 лет
		• Корпоративные университеты	
		• Стажировки в реальных проектах	
Зависимость от зарубежных библиотек	Историческое использование open source, ограниченные ресурсы на разработку	• Создание российских аналогов критически важных библиотек	2-4 года
		• Автоматические сканеры зависимостей	
		• Государственная поддержка	
Сложность сертификации	Бюрократические процедуры, отсутствие стандартизации	• Создание «песочниц» для	1-3 года
		• Упрощенные процедуры для отечественного ПО	
		• Разработка единых стандартов безопасности	
Низкая совместимость систем	Отсутствие единых стандартов, фрагментированность рынка	• Стандарт «Российская модульная архитектура» (РМА)	2-3 года
		• Открытые API и протоколы	
		• Государственные требования к совместимости	

Перспективы развития модульной архитектуры в России связаны с созданием национальных программных платформ, охватывающих весь технологический стек – от операционной системы до ИИ-компонентов. Успешные примеры

(Astra Linux, SberAI, Yadro AI Cloud) показывают, что такой путь возможен. Целью должно стать не просто импортозамещение, а создание конкурентоспособных решений для внутреннего и международного рынков.

Список источников

1. Фаулер М. Архитектурные шаблоны корпоративных приложений : учеб. пособие. Москва : Вильямс, 2007. 528 с.
2. Ньюман С. Построение микросервисов: проектирование мелкозернистых систем. Санкт-Петербург : Питер, 2023. 624 с.
3. О запрете использования иностранного программного обеспечения : постановление Правительства РФ от 16.12.2015 № 1236 (ред. от 2024 г.) // Собр. законодательства РФ. 2015. № 51. Ст. 7236.
4. Национальная программа «Цифровая экономика Российской Федерации» // Минцифры России : сайт. URL: <https://digital.gov.ru/target/nacionalnaya-programma-cifrovaya-ekonomika-rossijskoj-federaczii> (дата обращения: 10.10.2025).
5. Astra Linux Special Edition : операционная система : сайт / Astra Linux. URL: <https://astralinux.ru> (дата обращения: 10.10.2025).
6. Yadro AI Cloud: облачная инфраструктура для ИИ : сайт / ООО «Ядро». URL: <https://yadro.com> (дата обращения: 10.10.2025).

**ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЬЮТЕРНОГО
ЗРЕНИЯ В ЗАДАЧЕ БЕСКОНТАКТНОГО
УПРАВЛЕНИЯ МАНИПУЛЯТОРОМ**

УЛЬЯНОВ Даниил Михайлович, студент
*Поволжский государственный университет
телекоммуникаций и информатики
443010, Россия, Самара, bastarsy@gmail.com*

ОСАНОВ Владимир Андреевич, старший преподаватель
кафедры «Информатика и робототехнические системы»
*Поволжский государственный университет
телекоммуникаций и информатики
443010, Россия, Самара, v.osanov@psuti.ru*

Аннотация. Рассматривается практическая реализация системы бесконтактного управления антропоморфным манипулятором на основе компьютерного зрения и жестового интерфейса. В качестве главного инструмента в контуре управления используется MediaPipe. Повышение точности достигается за счет использования метода heatmap-регрессии. Полученные результаты подтверждают эффективность применения компьютерного зрения в задаче управления манипулятором.

Ключевые слова: компьютерное зрение, бесконтактное управление, жестовый интерфейс, манипулятор.

**PRACTICAL APPLICATION OF COMPUTER VISION IN THE TASK
OF CONTACTLESS MANIPULATOR CONTROL**

ULYANOV Daniil Mikhailovich, student
*Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics
443010, Russia, Samara, bastarsy@gmail.com*

OSANOV Vladimir Andreevich, Senior Teacher
at the Department of «Informatics and Robotic Systems»
*Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics
443010, Russia, Samara, v.osanov@psuti.ru*

Abstract. This paper examines the practical implementation of a contactless control system for an anthropomorphic manipulator based on computer vision and a gestural interface. MediaPipe is used as the main tool in the control loop. Improved accuracy is achieved through the use of a heatmap regression method. The obtained results confirm the effectiveness of computer vision in manipulator control.

Keywords: computer vision, contactless control, gesture interface, manipulator.

ВВЕДЕНИЕ

Первоначальные системы управления манипулятором ограничены зависимостью от физического контакта оператора с аппаратным интерфейсом, что вызывает операционные задержки, создает трудности управления в опасных средах и снижает эргономичность [1]. Для преодоления этих ограничений используются бесконтактные технологии, которые позволяют обеспечить прямую пространственно-кинематическую связь и естественную интуитивность взаимодействия.

К ключевым методам бесконтактного управления манипуляторами относятся компьютерное зрение [2], проксимальные сенсоры (LiDAR, ультразвук), носимые интерфейсы (англ. Inertial Measurement Unit – рус. инерциальный измерительный блок) и голосовые команды, интегрируемые с помощью сенсорного слияния. В свою очередь, компьютерное зрение обладает преимуществом перед другими методами [3], так как не только определяет положение объектов, но и распознает их тип/состояние, обеспечивая гибкую адаптированность под конкретную задачу в реальном времени.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Технология компьютерного зрения активно используется в рамках систем управления и навигации робототехнических комплексов, чему свидетельствует разнообразие подходов к ее интеграции в контур управления, которые напрямую зависят от контекста применения.

Управление манипулятором с помощью жестов является широко исследуемой научной задачей [4], в которой одну из ключевых ролей выполняет компьютерное зрение [5, 6].

Для обеспечения согласованного управления антропоморфными манипуляторами предложены специализированные алгоритмы технического зрения [7], которые решают задачу точного планирования траектории движения захватного модуля.

В работе [8] система компьютерного зрения в реальном времени отслеживала движения корпуса оператора, определяя его положение и пространственную ориентацию непосредственно по видеопотоку. Экспериментальное исследование системы показало, что общая точность составляет 94,1 %, а точность системы слежения за движением 96,5 %.

В статье [9] в качестве датчика восприятия окружающей среды используется глубинная камера, а также роботизированная рука с шестью степенями свободы и возможностями компьютерного зрения для достижения распознавания объектов, оценки позы и автономного захвата в многоцелевых сценариях.

АРХИТЕКТУРА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Принцип работы разрабатываемой системы управления (рис. 1) антропоморфным манипулятором (роборукой) базируется на бесконтактном жестовом интерфейсе, где в качестве сенсорного устройства используется видеокамера. Ее функция заключается в захвате изображения оператора (кисти руки), демонстрирующего статическую или динамическую конфигурацию кисти. На видеокадре в реальном времени выполняется детекция руки с последующей идентификацией ее ключевых точек.

Процесс преобразования жеста в управляющий сигнал положения манипулятора состоит из нескольких этапов. Пространственные координаты ключевых точек служат основой для расчета углового положения сервоприводов манипулятора.

Для минимизации колебаний и обеспечения плавности хода рассчитанные значения углов проходят цифровую фильтрацию, после чего передаются на исполняющие устройства.

ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ

Предлагаемый алгоритм основан на синтезе двух подходов: использование предобученной нейросетевой модели для детекции кисти (MediaPipe [10]) и математического аппарата для анализа пространственных данных с целью вычисления межфаланговых углов. Данный гибридный алгоритм реализует каскадный принцип обработки изображений, где на каждом этапе выполняется строго детерминированная операция по преобразованию и обогащению данных.

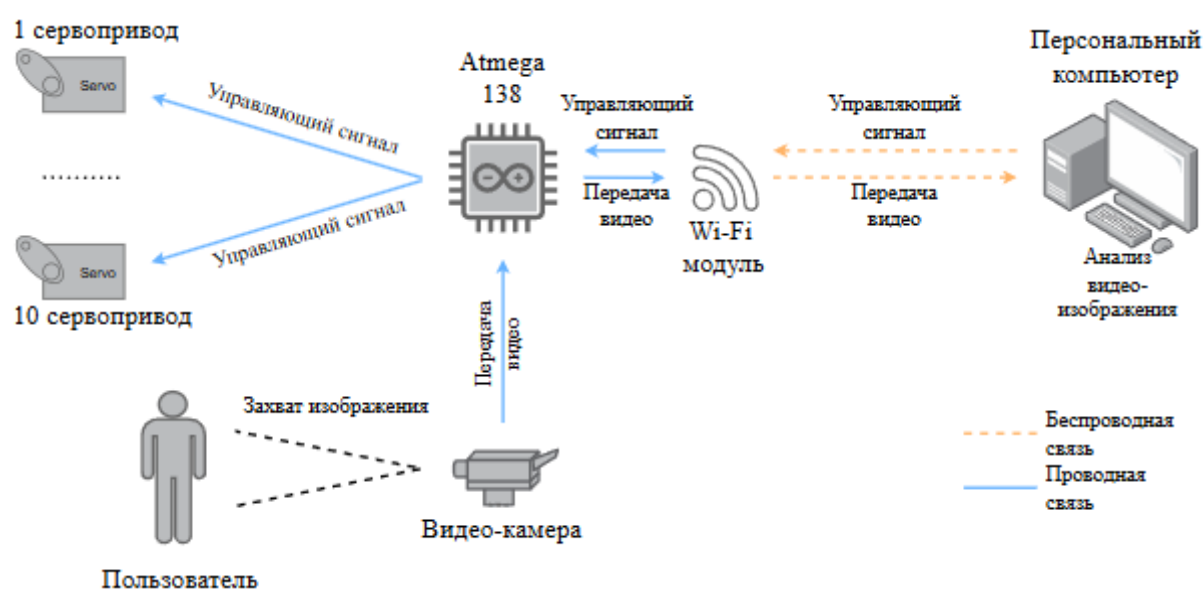


Рис. 1. Схема системы управления манипулятором на основе жестового интерфейса

Модель принимает на вход изображение размером 256×256 пикселей в RGB-формате и выдает набор из 21 ключевой точки для каждой обнаруженной руки (рис. 2).

Ключевой особенностью представленной модели является применение метода регрессии тепловых карт (heatmap-регрессии) для локализации ключевых точек. В рамках данного подхода для каждой искомой точки генерируется двумерная карта распределения вероятностей ее местоположения в пространстве кадра.

Указанная методология демонстрирует повышенную робастность к факторам частичной окклюзии (перекрытия) кисти и вариативности условий внешнего освещения.

Значение угла θ рассчитывается через взятие функции арккосинуса:

$$\theta = \arccos\left(\frac{(P_2 - P_1) * (P_3 - P_2)}{|P_2 - P_1| * |P_3 - P_2|}\right) * \frac{180}{\pi}.$$

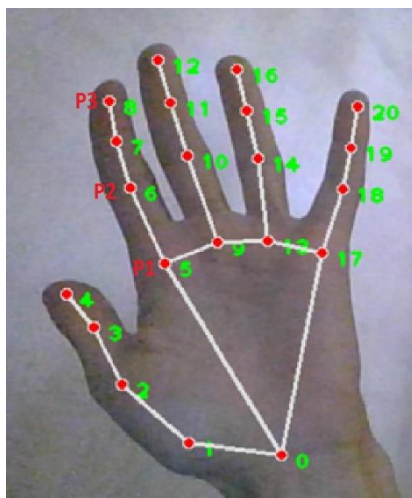


Рис. 2. Отображение ключевых точек на видеокадре

ВЫВОДЫ

Предложенная система управления, основанная на применении нейросетевой модели MediaPipe Hands, продемонстрировала высокую эффективность в задачах трекинга положения кисти в режиме реального времени с задержкой не более 40 мс. Перспективы развития данного алгоритма связаны с интеграцией трехмерного анализа положения руки (используя данные с глубинных камер).

Список источников

1. Малахов О. С., Елгина, А. Е. Обзор систем управления манипулятором // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования : тезисы 80-й междунар. науч.-техн. конф. Т. 1. Магнитогорск. 2022. С. 261.
2. Исследование алгоритмов управления роботом-манипулятором с использованием технологий технического зрения / Д. Ш. Мусина, Д. О. Кожахметова, Е. А. Оспанов, Т. С. Жылкыбаев // Вестник Университета Шакарима. Серия технические науки. 2025. № 1. С. 5–12.
3. Булгаков К. А., Станкевич В. Е. Подходы к реализации современных систем управления роботизированными комплексами и системами с применением

компьютерного зрения // Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Наука и производство : материалы 21-й всерос. науч.-практ. конф. Старый Оскол : НИТУ «МИСИС», 2024. С. 553–558.

4. Analysis of the Human-Machine Interface for Controlling a Robotic Manipulator Using Gestures / A. M. Sabanchiev, R. S. Nakhushev, A. A. Chetvertakov, M. I. Aliev. DOI: 10.1109/ITQMIS51053.2020.9322920 // International Conference Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies (IT&QM&IS). Yaroslavl, Russia, 2020. P. 341–344.

5. Колегаев Б. Я. Управление роботизированной рукой на основе компьютерного зрения // Молодой исследователь Дона. 2024. Т. 9, № 2 (47). С. 13–17.

6. Yang Z., Xinjun H., Yudong Y. Design and Research of Industrial Robot Control System Based on Machine Vision. DOI: 10.1109/ICECA52323.2021.9675959 // 5th International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA). Coimbatore, India, 2021. P. 209-212.

7. Алгоритмы технического зрения для управления движениями антропоморфных манипуляторов / В. А. Крамарь, А. Н. Путин, Д. А. Токарев, А. А. Кабанов // Автоматизация и измерения в машино-, приборостроении. 2020. № 1 (9). С. 40–49.

8. Real-Time Upper Body Motion Tracking Using Computer Vision for Improved Human-Robot Interaction and Teleoperation. DOI: 10.1109/MERCon60487.2023.10355479 / N. A. S. N. Nandasena et al. // Moratuwa Engineering Research Conference (MERCon). Moratuwa, Sri Lanka, 2023. P. 201–206.

9. Robotic Arm Grasping System Based on Computer Vision and Brain-Computer Interface / J. Lou et al. 10.1109/ICRCA64997.2025.11011171 // 9th International Conference on Robotics, Control and Automation (ICRCA). Shanghai, China, 2025. P. 50–54.

10. Quiñonez Y., Lizarraga C., Aguayo R. Machine Learning solutions with MediaPipe. DOI: 10.1109/CIMPS57786.2022.10035706 // 11th International Conference On Software Process Improvement (CIMPS). Acapulco, Guerrero, Mexico, 2022. P. 212–215.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ МНОГОМАСШТАБНОГО КОДИРОВАНИЯ ДЛЯ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

УСТИНОВА Елена Сергеевна, кандидат физико-математических наук,
доцент высшей школы передовых производственных технологий
Поволжский государственный университет сервиса
445017, Россия, Тольятти, nik-098@yandex.ru

Аннотация. Спектральное кодирование является важным способом описания спектральных характеристик и закономерностей. Традиционные методы статистического кодирования могут получить только локальную адаптивность, поскольку разные объекты должны иметь свои собственные наилучшие шкалы кодирования. При обработке дифференциальных сигналов из гиперспектральных изображений (HSI) для точного определения наземных объектов в данном исследовании был рассмотрен метод многомасштабного кодирования (MSE) с SSI и двумя стратегиями оптимизации.

Ключевые слова: гиперспектральные изображения, анализ изображений, многомасштабное кодирование, спектральное описание.

RESEARCH OF MULTISCALING CODING METHODS FOR HYPERSPECTRAL IMAGES

USTINOVA Elena Sergeevna, Candidate of Physical and Mathematical
Sciences, Associate Professor at the Graduate School
of Advanced Manufacturing Technologies
Volga Region State University of Service
445017, Russia, Togliatti, nik-098@yandex.ru

Abstract. Spectral coding is an important way to describe spectral characteristics and patterns. Traditional statistical coding methods can only achieve local adaptability, as different objects should have their own best coding scales. In this study, we used the multiscale coding (MSE) method with SSI and two optimization strategies to accurately identify ground objects from differential signals in hyperspectral images (HSI).

Keywords: hyperspectral images, image analysis, multiscale coding, and spectral description.

ВВЕДЕНИЕ

Гиперспектральная визуализация (HSI) может обеспечить обилие спектральных сигналов для обнаружения наземных объектов [1, 2]. Технология гиперспектрального дистанционного зондирования собирает сигналы отражения от поверхности. Методы кодирования спектральных сигналов являются оптимальными способами для гиперспектральной визуализации, поскольку они могут показывать спектральную информацию и понижать воздействие шумов [3]. Кроме того, методы спектрального кодирования могут непосредственно описывать спектральные характеристики.

Стандартные процессы спектрального кодирования используют два метода выражения спектральных сигналов для обнаружения объектов в гиперспектральной визуализации: кодирование информации о спектральной амплитуде (SAI) и кодирование информации о спектральной форме (SSI) [4]. Однако большинство способов, как правило, используют только закодированный SAI для распознавания наземных объектов. В результате был предложен метод кодирования спектральных производных признаков для определения SSI. Он обеспечил превосходное решение для выражения спектральных деталей. В дальнейшем во многих методах использовали эту стратегию для непосредственного описания SSI [5].

В 2022 году предложили технологию спектрального извлечения генов (SGE), основанную на методе спектрального кодирования ДНК. Из спектров, закодированных ДНК, были извлечены специфические спектральные фрагменты ДНК. Это позволило избежать нестабильности, вызванной эволюционными вычислениями. Метод SGE считался подходящим для получения гиперспектральных изображений. Однако поскольку технология SGE возникла на основе метода спектрального кодирования ДНК, она позволяет получать лишь грубую спектральную информацию.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В этом исследовании было проведено сравнение четырех широко используемых гиперспектральных методов визуализации для проверки производительности. Метод MSE с SSI требует только несколько образцов для получения результатов обнаружения. Однако методы, основанные на искусственной нейронной сети (ANN), требуют много образцов для обучения сети. Было неправильно сравнивать данные методы с предлагаемым решением. Таким образом, было выбрано минимальное евклидово расстояние (MED), спектральный угловой картограф (SAM), двоичное кодирование (BC), спектральное сопоставление ДНК (SDM) и машина опорных векторов (SVM) в качестве алгоритмов контраста в этом исследовании. MED, SAM и BC не имели адаптивных параметров. Все методы не имеют процесса настройки гиперпараметров.

ВЫВОДЫ

В данном исследовании были предложены методы MSE с SSI и стратегии динамической оптимизации для описания гиперспектральных изображений. Из экспериментальных результатов было сделано несколько выводов: (1) SSI важен для предлагаемого метода. Он помогает инициализировать метод MSE с SSI без большого набора выборок. Малые выборки могут обеспечить его высокую эффективность при обнаружении наземных объектов. (2) Стратегии кодирования подходят для различных условий. RES подходит для обнаружения конкретных наземных объектов. UES подходит для получения наилучших результатов глобального обнаружения.

Список источников

1. Абрамов С. К., Лукин В. В. Проблемы автоматизации обработки гиперспектральных изображений дистанционного зондирования // *Авиационно-космическая техника и технология*. 2015. № 6. С. 101–110.
2. Гашников М. В., Глумов Н. И. Иерархическая компрессия в задаче хранения гиперспектральных изображений // *Компьютерная оптика*. 2014. Т. 38, № 3. С. 482–488.

3. Замятин А. В., Сарина А. Ж. Алгоритм сжатия гиперспектральных аэрокосмических изображений с учетом междиапазонной // Прикладная информатика. 2013. Т. 47, № 5. С. 35–42.
4. Попов М. А., Станкевич М. А. Методы оптимизации числа спектральных каналов в задачах обработки и анализа данных дистанционного зондирования Земли // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2006. № 1. С. 106–112.
5. Моделирование и тематическая обработка изображений, идентичным видеоданным с готовящейся к запуску и разрабатываемой гиперспектральной аппаратуры ДЗЗ / Л. Н. Чабан [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9, № 2. С. 111–121.
6. Ustinova E. S. Normal waves of a plane waveguide with non-reciprocal properties of its filling media. DOI: 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271277 // International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). Vladivostok, Russia, 2020. P. 1-5.
7. Устинова Е. С. Резонаторы на основе невязимных структур // Успехи современной радиоэлектроники. 2019. № 5. С. 58–64.
8. Самохина Н. С., Прокопенко А. С. Разработка виртуальной машины для генерации программного кода // Информационно-технологический вестник. 2025. № 3 (45). С. 13–24.
9. Самохина Н. С., Ефремов, А. С. Алгоритмические методы событийно-прогнозного управления качеством сложных систем обработки данных: интеграция системного анализа и вычислительного моделирования. DOI 10.33693/2313-223X-2025-12-2-75-81 // Computational Nanotechnology. 2025. Т. 12, № 2. С. 75–81.

**РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРЕМИАЛЬНОГО
ФОНДА НА ОСНОВЕ ИНТЕГРАЦИИ ВЕБ-ПОРТАЛА
И СИСТЕМЫ 1С:ЗАРПЛАТА И КАДРЫ**

ФРАНЦУЗОВА Надежда Николаевна, ассистент

Поволжский государственный университет

телекоммуникаций и информатики

443124, Россия, Самара, n.francuzova@psuti.ru

НИКИФОРОВ Данила Иванович, студент

Поволжский государственный университет

телекоммуникаций и информатики

443124, Россия, Самара, danila_nikiforov_06@mail.ru

Аннотация. В институте существует проблема отсутствия интеграции между корпоративным порталом вуза и системой «1С:Зарплата и кадры», что приводит к дублированию ручного ввода и ошибкам при распределении премиального фонда. Для решения этой задачи предлагается архитектурное решение на основе клиент-серверной модели с использованием веб-сервиса. В работе описывается принципиальная схема взаимодействия систем, где портал выступает в роли клиента, а 1С – в роли сервера, предоставляющего API.

Ключевые слова: распределение премиального фонда, веб-сервис, архитектурное решение, 1С:Зарплата и Кадры, автоматизация бизнес-процессов.

**DEVELOPMENT OF A PREMIUM FUND DISTRIBUTION
SYSTEM BASED ON THE INTEGRATION OF A WEB PORTAL
AND THE 1C:SALARY AND PERSONNEL SYSTEM**

FRANZUZOVA Nadezhda Nikolaevna, Assistant

Volga State University of Telecommunications and Informatics

443124, Russia, Samara, n.francuzova@psuti.ru

NIKIFOROV Danila Ivanovich, student

Volga State University of Telecommunications and Informatics

443124, Russia, Samara, danila_nikiforov_06@mail.ru

Abstract. The institute has a problem of lack of integration between the corporate portal of the university and the system “1C:Salary and personnel”, which leads to

duplication of manual input and errors in the distribution of the bonus fund. To solve this problem, an architectural solution based on the client-server model using a web service is proposed. The paper describes a basic scheme of interaction between systems, where the portal acts as a client and 1C acts as a server providing an API.

Keywords: distribution of the bonus fund, web service, architectural solution, 1C:Salary and Personnel, business process automation.

ВВЕДЕНИЕ

Современные системы управления вузом включают в себя несколько разнородных систем: портал для взаимодействия с преподавателями и студентами, 1C:Университет и систему расчета заработной платы (1C:ЗУК). Отсутствие интеграции между этими системами приводит к дублированию данных, ручному вводу и увеличению количества ошибок. Задача автоматической передачи процента премии из портала в 1C:ЗУК является актуальной проблемой, решение которой повышает эффективность административного персонала.

Целью данного исследования является разработка алгоритма внедрения модуля распределения премиального фонда, обеспечивающего интеграцию корпоративного портала университета с системой «1C:Зарплата и кадры».

Анализ предметной области выявил сложный многоуровневый бизнес-процесс распределения премиального фонда в университетской среде, характеризующийся строгой иерархической ролевой моделью, жесткими временными регламентами закрытия расчетных периодов и необходимостью соблюдения множества формальных ограничений и согласований, что в условиях использования разрозненных систем – корпоративного портала и 1C:Зарплата и кадры – порождает проблему многократного ручного ввода данных, значительных временных задержек и высокого риска возникновения ошибок.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Предлагаемая архитектура основана на клиент-серверной модели, где веб-портал выступает в роли клиента, а информационная база 1C:ЗУК – в роли сервера, предоставляющего веб-сервис.

Основные компоненты:

1. **Веб-портал института:** На нем реализуется интерфейс (например, отдельная страница для методиста или деканата) для выбора преподавателя и установки процента премии.
2. **REST или SOAP Веб-сервис в 1С:ЗУК:** Специально создаваемая конфигурация 1С публикует веб-сервис, который принимает данные от портала.
3. **Механизм аутентификации и авторизации:** Обеспечивает безопасный доступ портала к 1С (например, по логину/пароллю или API-ключу).
4. **Объект передачи данных (Data Transfer Object – DTO):** Стандартизированная структура данных (например, в формате JSON), передаваемая между системами.

Принцип работы:

1. Авторизованный пользователь на портале назначает преподавателю процент премии и инициирует сохранение данных.
2. Клиентский скрипт портала формирует HTTP POST запрос, содержащий данные в формате JSON [1].
3. Данный запрос направляется на URL-адрес опубликованного веб-сервиса 1С .
4. Система 1С:ЗУК принимает запрос, проводит проверку авторизации и выполняет парсинг переданных данных.
5. В базе 1С осуществляется поиск соответствующего сотрудника, после чего показатель процента премии фиксируется в предназначенном для этого атрибуте (например, в справочнике «Сотрудники» или в специальном регистре сведений).
6. 1С направляет на портал ответ, сигнализирующий об успешном выполнении операции или о возникшей ошибке.
7. Портал отображает пользователю статус выполненного действия.

В рамках реализации механизма интеграции первоначальным этапом является подготовка серверной части системы 1С:ЗУК к обработке внешних запросов, что осуществляется путем создания в конфигураторе специализированного веб-сервиса с соответствующими методами (например, SetPremiumPercentage) и

его последующей публикации на веб-сервере через модуль администрирования.

Параллельно на стороне веб-портала реализуется клиентская составляющая системы, включающая разработку HTML-форм для ввода пользовательских данных, серверную логику на PHP или Java (Spring Boot-приложение с использованием RestTemplate/WebClient для выполнения REST-вызовов) для организации защищенного взаимодействия с API 1С через HTTP-протокол с базовой аутентификацией , обработки JSON-сериализации/десериализации данных, а также механизм асинхронной обработки ответов средствами JavaScript на клиентской стороне для обеспечения интерактивного отображения результатов операций пользователю .

ВЫВОДЫ

Предложенное решение демонстрирует эффективный и современный подход к интеграции веб-портала и системы 1С:ЗУК. Использование REST API позволяет создать гибкое, масштабируемое и поддерживаемое решение . Данный механизм успешно автоматизирует процесс передачи данных о премировании, исключает дублирование ручного ввода и снижает количество ошибок, что в конечном итоге повышает производительность труда административного персонала вуза.

Список источников

1. Introducing JSON : [сайт]. URL: https://www.json.org/json-en.html?trk=article-ssr-frontend-pulse_little-text-block (дата обращения: 05.09.2025).

РЕКОНФИГУРИРУЕМЫЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ПОВЕРХНОСТИ КАК СРЕДСТВО УЛУЧШЕНИЯ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ В БЕСПРОВОДНЫХ СИСТЕМАХ

ЧЕРНОВ Виктор Сергеевич, аспирант

Рязанский государственный радиотехнический университет

имени В. Ф. Уткина

390005, Россия, Рязань, Chernov.V.713@yandex.ru

Аннотация. Работа посвящена исследованию влияния реконфигурируемых интеллектуальных поверхностей на качество беспроводной связи. Проводится анализ сценариев распространения сигнала с прямой видимостью и без прямой видимости. Рассматривается теоретическая модель и результаты численного моделирования, демонстрирующие прирост отношения сигнал-шум благодаря оптимальной фазовой настройке поверхности.

Ключевые слова: реконфигурируемая интеллектуальная поверхность, беспроводная связь, пропускная способность, моделирование канала связи, управление фазой, 5G.

RECONFIGURABLE INTELLIGENT SURFACES AS A MEANS OF IMPROVING THROUGHPUT IN WIRELESS SYSTEMS

CHERNOV Viktor Sergeevich, PhD student

Ryazan State Radio Engineering University

named after V. F. Utkin

390005, Russia, Ryazan, Chernov.v.713@yandex.ru

Abstract. The work is devoted to studying the impact of reconfigurable intelligent surfaces on the quality of wireless communication. It analyzes signal propagation scenarios with and without line-of-sight. A theoretical model and numerical simulation results are presented, demonstrating an improvement in the signal-to-noise ratio achieved through optimal phase configuration of the surface.

Keywords: reconfigurable intelligent surfaces, wireless system, throughput, communication channel modeling, phase control, 5G.

ВВЕДЕНИЕ

Реконфигурируемые интеллектуальные поверхности (Reconfigurable Intelligent Surfaces, RIS) представляют собой пассивные или маломощные структуры, позволяющие управлять отраженным электромагнитным полем и формировать желаемые условия распространения радиосигнала. В отличие от традиционных активных ретрансляторов, RIS не требуют значительных энергетических затрат, так как не усиливают сигнал, а лишь адаптивно изменяют фазы и амплитуды отражения [1–3]. Это делает технологию перспективной для будущих систем 5G, где важными задачами являются повышение спектральной эффективности и создание управляемой радиосреды.

В современных исследованиях RIS рассматриваются как средство повышения качества связи в сложных условиях распространения, особенно в случаях отсутствия прямой видимости (NLOS). Активно изучаются вопросы конфигурации элементов RIS, алгоритмов оптимизации фаз и интеграции RIS в архитектуру сети. Значительный интерес вызывает и моделирование RIS, позволяющее оценить влияние размера поверхности, расстояний, мощности передатчика и других факторов на производительность системы [2, 4–6].

В настоящее время существует два подхода к созданию RIS [1]. Первый подход – использовать отражающую решетку с фазовращателем для каждого элемента. Это работает аналогично традиционным пассивным фазированным решеткам. Альтернативный подход – построить поверхность как метаповерхность. Изменяя характеристики метаматериала, можно модифицировать отраженный сигнал от конкретного элемента. По сравнению с отражающей решеткой элементы в метаповерхности могут располагаться плотнее друг к другу [5, 7, 8].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Моделируемая система включает передатчик, пользовательское устройство и прямоугольную RIS, состоящую из равномерно расположенных элементов, каждый из которых может менять фазу отражения (рис. 1).

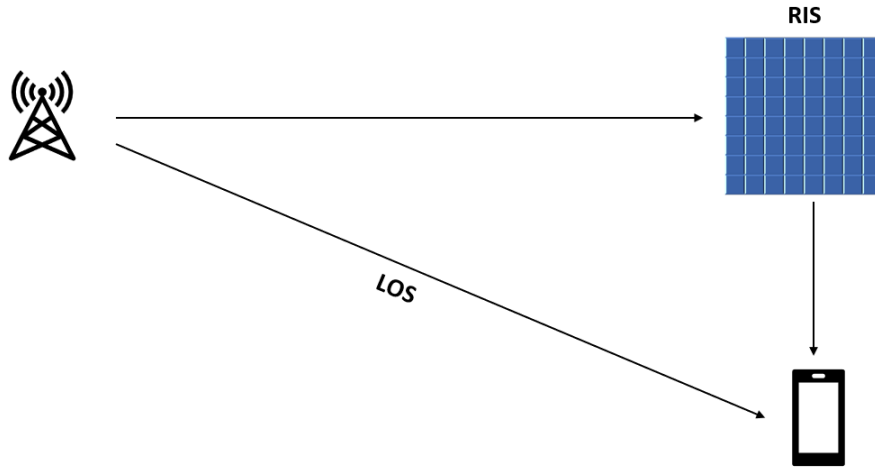


Рис. 1. Структура системы передачи сигнала

Вычисление ОСШ при передаче сигнала.

ОСШ рассчитывается для четырех сценариев: прямая видимость без RIS, прямая видимость с поддержкой RIS без фазовой подстройки, прямая видимость с поддержкой RIS с фазовой подстройкой, без прямой видимости с поддержкой RIS с фазовой подстройкой.

Для расчета ОСШ вычисляется модель канала для каждого звена:

$$h = \frac{\lambda}{4\pi d} e^{-j\frac{2\pi d}{\lambda}}$$

где d – расстояние канала;

λ – длина волны.

В случае отражения модель канала:

$$h_{RIS} = \sum_{n=1}^N h_{1,n} r_n h_{2,n},$$

где h_1 – модель канала до отражателя;

h_2 – модель канала после отражателя;

r – коэффициент отражения элемента.

Чтобы все отраженные сигналы складывались когерентно, фаза элемента должна компенсировать фазовые задержки каналов.

Конечная модель канала h_f будет отличаться в разных случаях. Для передач без/до отражения h_{RIS} в расчете не фигурирует.

В итоге ОСШ вычисляется по формуле:

$$SNR = \frac{P|h_f|^2}{\sigma^2},$$

где P – мощность передатчика;

σ – шумовая мощность.

После моделирования получаем значения SNR для сценариев:

1. $SNR_1 = 18,6$ (LOS).
2. $SNR_2 = 18,7$ (LOS и RIS без подстройки).
3. $SNR_3 = 28,5$ (LOS и RIS с подстройкой).
4. $SNR_4 = 27,2$ (NLOS и RIS с подстройкой).

ВЫВОДЫ

Проведенное исследование показало высокую эффективность применения реконфигурируемых интеллектуальных поверхностей в беспроводных системах связи. Моделирование подтвердило, что использование RIS без фазовой подстройки практически не изменяет качество связи, так как отраженные сигналы складываются некогерентно. Однако при оптимальной фазовой настройке элементов поверхности наблюдается существенный прирост отношения сигнал-шум: более чем на 10 дБ по сравнению с исходным сценарием прямой видимости. Это демонстрирует способность RIS формировать направленный отраженный канал и эффективно усиливать сигнал без активного усиления и роста энергетических затрат [1, 8].

Особенно важно, что в условиях отсутствия прямой видимости оптимально настроенная RIS обеспечивает уровень SNR, сопоставимый со сценарием прямой видимости, что подтверждает ее способность компенсировать геометрически неблагоприятные условия распространения. Таким образом, RIS представляет собой перспективный инструмент повышения пропускной способности и устойчивости современных и будущих беспроводных сетей, обеспечивая улучшение канальных характеристик за счет управления радиосредой, а не увеличения мощности передатчика.

Список источников

1. Q. Wu, S. Zhang, B. Zheng, C. You and R. Zhang, "Intelligent Reflecting Surface-Aided Wireless Communications: A Tutorial," in IEEE Transactions on Communications, vol. 69, no. 5, pp. 3313-3351, May 2021, doi: 10.1109/TCOMM.2021.3051897.
2. Reconfigurable intelligent surfaces for energy efficiency in wireless Communication / C. Huang et al. DOI: 10.1109/TWC.2019.2922609 // IEEE Transactions on Wireless Communications. 2019. Vol. 18, iss 8. P. 4157 – 4170.
3. Intelligent reflecting surface versus decode-and-forward: How large surfaces are needed to beat relaying? / E. Björnson et al. DOI: 10.1109/LWC.2019.2950624 // IEEE Wireless Communications Letters. 2020. Vol. 9, iss 2. P. 244 - 248.
4. Wu Q., Zhang R. Towards smart and reconfigurable environment: Intelligent reflecting surface aided wireless network. DOI: 10.1109/MCOM.001.1900107 // IEEE Communications Magazine, 2020. Vol. 58, iss 1. P. 106 - 112.
5. Smart radio environments empowered by reconfigurable AI meta-surfaces: An idea whose time has come / Renzo M. D. et al. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13638-019-1438-9> // EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking. 2019. No 129. URL: <https://link.springer.com/article/10.1186/s13638-019-1438-9> (date of request: 15.11.2025).
6. Wireless communications through reconfigurable intelligent surfaces. / E. Basar et al. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2935192 // IEEE Access. 2019. Vol. 7. P. 116753-116773.
7. Tang Wireless communications with programmable metasurface: Transceiver design and experimental results / W. Tang et al. DOI: 10.23919/j.cc.2019.05.004 // China Communications. 2019. Vol. 16, no. 5. P. 46-61.
- 8 M. Z. Siddiqi and T. Mir, "Reconfigurable intelligent surface-aided wireless communications: An overview," in Intelligent and Converged Networks, vol. 3, no. 1, pp. 33-63, March 2022, doi: 10.23919/ICN.2022.0007.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ВАРИАНТОВ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ
МНОГОЭЛЕМЕНТНОЙ ЛИНЕЙКИ ФОТОПРИЕМНИКОВ
В ДАТЧИКЕ ЛИНЕЙНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ**

ЧЕРТОРИЙСКИЙ Алексей Аркадьевич, кандидат технических наук,
доцент, ведущий научный сотрудник
*Ульяновский филиал Института радиотехники и электроники
им. В. А. Котельникова РАН*
432000, Россия, Ульяновск, a-tchertor@yandex.ru

КАШТАНОВ Никита Валерьевич, научный сотрудник
*Ульяновский филиал Института радиотехники и электроники
им. В. А. Котельникова РАН*
432000, Россия, Ульяновск
Ульяновский государственный технический университет
432027, Россия, Ульяновск ya@nkashtanov.ru

Аннотация. Представлены результаты численного моделирования оптического датчика линейных перемещений на основе многоэлементной линейки фотоприёмников (МЛФП). Проведено сравнение метода корреляционной обработки сигнала с МЛФП и центроид-метода. Показано, что в идеальных условиях погрешность метода корреляционной обработки возможно уменьшить до $\pm 0,55$ пикселя путем интерполяции сигнала с МЛФП.

Ключевые слова: фотоприемная линейка, оптический датчик, корреляционная обработка, центроид-метод, численное моделирование.

**MODELING OF SIGNAL PROCESSING OPTIONS FOR
A LINEAR IMAGE SENSOR IN A LINEAR DISPLACEMENT SENSOR**

CHERTORIYSKIY Alexey Arkadevich, Candidate of Engineering
Sciences, Associate Professor, leading researcher
*Ulyanovsk Branch of the Kotelnikov Institute
of Radio Engineering and Electronics of RAS*
432000, Russia, Ulyanovsk, a-tchertor@yandex.ru

KASHTANOV Nikita Valerevich, researcher
*Ulyanovsk Branch of the Kotelnikov Institute
of Radio Engineering and Electronics of RAS*

Abstract. The results of math simulation of an optical linear displacement sensor based on a linear image sensor (LIS) are presented. The method of correlation signal processing with LIS and the centroid-method is compared. It is shown that under ideal conditions, the error of the correlation processing method can be reduced to ± 0.55 pixels by interpolating the LIS signal.

Keywords: linear image sensor, optical sensor, correlation processing, math simulation.

ВВЕДЕНИЕ

Оптические датчики линейных перемещений в последние годы получили широкое распространение. Их главным преимуществом является отсутствие механического воздействия на объект, что исключает влияние измерительного процесса на контролируемую систему и повышает точность. Благодаря этому такие датчики используются в приборах для определения массы [1], измерения угловой скорости [2], давления [3, 4], контроля оптического спектра [5].

В качестве чувствительного элемента в подобных устройствах эффективно применяются многоэлементные линейки фотоприемников (МЛФП) [3–5].

Один из возможных вариантов построения оптического узла датчика линейных перемещений на основе МЛФП представлен на рис. 1. Шторка с прорезью жестко соединена с объектом, положение которого требуется контролировать. Световой поток от источника, проходя через прорезь, формирует на фоточувствительной области МЛФП световое пятно. При смещении объекта это пятно перемещается вдоль линейки, что вызывает соответствующее изменение выходного электрического сигнала.

Одной из ключевых задач при проектировании оптических датчиков на основе МЛФП является повышение точности измерений, которое, в том числе, может быть достигнуто за счет разработки более совершенных методов обработки сигнала с МЛФП.

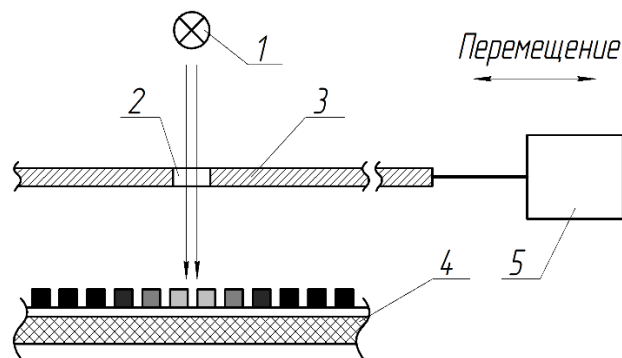


Рис. 1. Схема оптической части датчика (1 – источник света, 2 – прорезь, 3 – пластина, 4 – МЛФП, 5 – объект диагностики)

Одним из способов вычисления координаты оптического пятна является центроид-метод [6]:

$$x_{max} = \frac{\sum_k k * S_k}{\sum_k S_k}, \quad (1)$$

где k – номер пиксела, S_k – значение сигнала с k -ого пиксела.

Альтернативой центроид-методу выступает метод корреляционной обработки [7]. Задачу корреляционной обработки можно представить как поиск такого смещения τ опорного сигнала, при котором значение следующего выражения становится максимальным:

$$B(\tau) = \int_0^{\infty} f_{\text{опорн.}}(x - \tau) f_{\text{МЛФП}}(x) dx, \quad (2)$$

где $f_{\text{опорн.}}(x)$ – функция, описывающая опорный сигнал; $f_{\text{МЛФП}}(x)$ – сигнал, с МЛФП.

Задачей данного исследования является сравнение погрешности расчета положения оптического пятна, полученного с помощью обоих методов, в случае динамического режима работы датчика.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Исследование проводилось методами математического моделирования. Использовалась методика, описанная в работе [8], дополненная расчетом координаты светового пятна по формуле (2). Важно отметить, что в первом варианте корреляционной обработки сигнал с фотоприемной линейки $f_{\text{МЛФП}}(x)$ – дискрет-

ный. Во втором случае с целью повышения точности сигнал $f_{\text{МЛФП}}(x)$ подвергался интерполяции полиномом третьей степени. В качестве $f_{\text{опорн.}}(x)$ применялась функция Гаусса [9].

Результаты моделирования представлены на рис. 2.

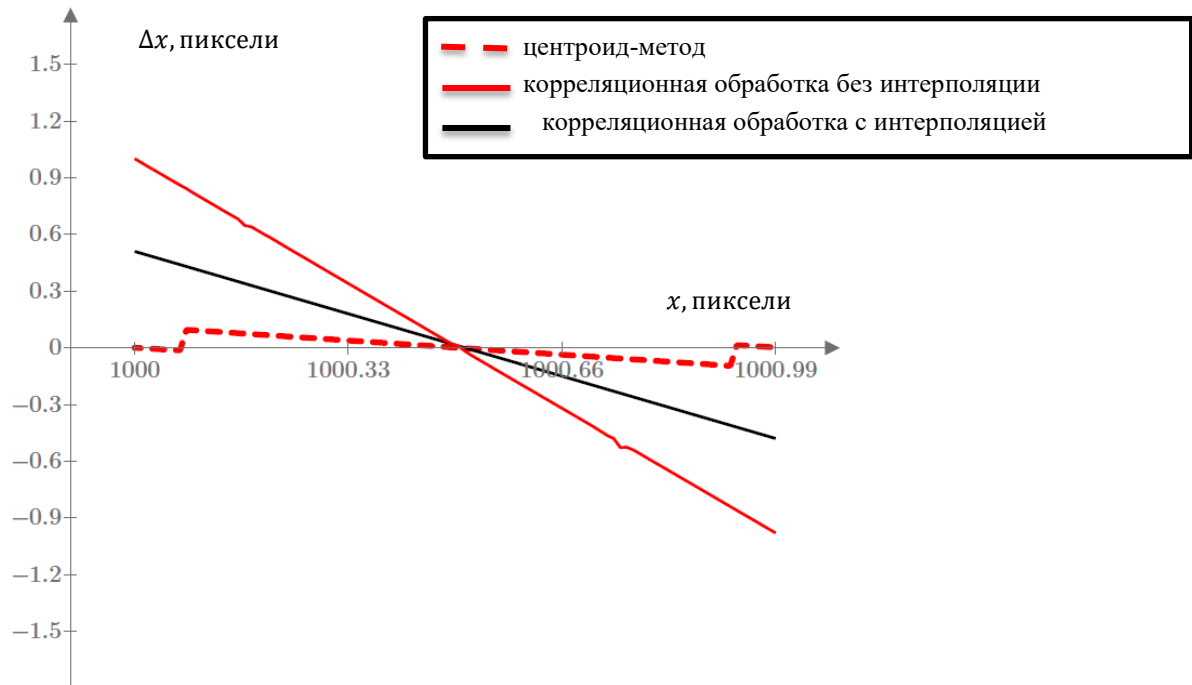


Рис. 2. Зависимость погрешности оценки положения светового пятна от его истинного положения

ВЫВОДЫ

По результатам моделирования видно, что положение светового пятна само по себе влияет на точность работы датчика. Центроид-метод в данном случае выигрывает в точности: его погрешность не превышает $\pm 0,1$ пикселя, в то время как вычисление координаты пятна методом корреляционной обработки происходит с погрешностью ± 1 пиксель. Использование интерполяции позволяет снизить эту погрешность до $\pm 0,55$ пикселя. Однако стоит отметить, что для полного сравнения необходимо провести моделирование в условиях воздействия вибрации на контролируемый объект [10], учесть неравномерную светочувствительность по пикселям МЛФП [11], а также наличие электрических шумов.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН (FFWZ-2025-0005).

Список источников

1. Антонец И. В., Нигматуллина Л. А., Милашкин А. А. Весоизмерительные устройства с кольцевым упругим чувствительным элементом и вторичным преобразователем // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 12. С. 342–347.
2. Лазарев В. А., Иванов П. А., Усков А. Д. Способ оценки внутриоборотной неустойчивости скорости вращения осей моделирующего стенда. DOI: 10.17586/0021-3454-2025-68-1-67-78 // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2025. Т. 68, № 1. С. 67–78.
3. Патент № 2846393 С1 Российская Федерация, МПК G01L 7/08. Измеритель параметров окружающего и набегающего воздушных потоков на летательных аппаратах : № 2025107393 : заявл. 27.03.2025 : опубл. 04.09.2025 / Антонец И. В., Каштанов Н. В., Черторийский А. А., Борисов Р. А., Борисова Д. Р. ; заявитель ФГБОУ ВО «Ульянов. ин-т гражданской авиации им. Главного маршала авиации Б. П. Бугаева».
4. Патент № 2827305 С1 Российская Федерация, МПК G01L 7/08, G01L 11/02. Измеритель параметров окружающего и набегающего воздушных потоков на летательных аппаратах : № 2024108153 : заявл. 28.03.2024 : опубл. 23.09.2024 / Антонец И. В., Борисов Р. А., Черторийский А. А., Каштанов Н. В., Курносов Д. В. ; заявитель ФГБОУ ВО «Ульянов. ин-т гражданской авиации им. Главного маршала авиации Б. П. Бугаева».
5. Казаков В. И. Система оптического спектрального контроля на базе дифракционного решеточного прибора // Волновая электроника и инфокоммуникационные системы : материалы XXVI Междунар. науч. конф. : в 3 ч. Ч. 2. Санкт-Петербург, 2023. С. 174–180.
6. Каштанов Н. В., Черторийский А. А. Особенности применения многоэлементной фотоприемной линейки для измерения малых линейных перемещений // Вузовская наука в современных условиях : сб. материалов 56-й науч.-техн. конф. : 24–29 января 2022 г. : в 2 ч. Ч. 1. Ульяновск : УлГТУ, 2022. С. 180–183.

7. Черторийский А. А., Веснин В. Л., Беринцев А. В. Особенности корреляционной обработки сигналов датчиков на основе волоконно-оптических брэгговских решеток // Радиоэлектронная техника : межвуз. сб. науч. тр. Ульяновск : УлГТУ, 2011. С. 193–198.

8. Kashtanov N., Chertoriysky A. Simulation of the Operation of a Linear Image Sensor as Part of a Linear Displacement Measurement Device. DOI: 10.1109/APEDE59883.2024.10715818 // 2024 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE). Saratov, 2024. P. 163-166.

9. Каштанов Н. В., Черторийский А. А. Моделирование процесса формирования светового пятна в датчике линейных перемещений на основе многоэлементной фотоприемной линейки. DOI: 10.61527/RET-2024.114-121 // Радиоэлектронная техника : межвуз. сб. науч. тр. Ульяновск : УлГТУ, 2024. С. 114–121.

10. Каштанов Н. В. Повышение точности оптического датчика перемещений в условиях воздействия вибрации на контролируемый объект. DOI: 10.17586/0021-3454-2025-68-10-870-875 // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2025. Т. 68, № 10. С. 870–875.

11. Каштанов Н. В. Экспериментальное исследование неравномерности светочувствительности пикселей ПЗС-линейки // Актуальные проблемы физической и функциональной электроники : материалы 28-ой Всерос молодёж. конф. Ульяновск : УлГТУ, 2025. С. 401–403.

УСТРОЙСТВО ФИКСАЦИИ НУЛЕВОЙ РАДИАЛЬНОЙ СКОРОСТИ ОБЪЕКТА

Шакурский Максим Викторович, доктор технических наук,
доцент, заведующий кафедрой «Информационная безопасность»
Поволжский государственный университет
телекоммуникаций и информатики
443110, Россия, Самара, M.Shakurskiy@psuti.ru

Аннотация. Разработанное устройство фиксации нулевой радиальной скорости объекта отличается увеличенной разрешающей способностью за счет использования трехчастотной автоколебательной системы, работающей в режиме повышенной чувствительности, и эффекта усиления девиации частоты генерируемого сигнала. Длительность всплеска выходного сигнала в момент нулевой радиальной скорости объекта многократно уменьшается, что снижает погрешность измерения. Рассматривается цифровая реализация устройства.

Ключевые слова: автоколебательная система, нулевая радиальная скорость объекта, эффект Доплера, точность измерения, эффект повышенной чувствительности.

DEVICE FOR RECORDING ZERO RADIAL VELOCITY OF AN OBJECT

Shakurskiy Maxim Victorovich, Doctor of Engineering Sciences,
Associate Professor, head at the Department of «Information security»
Povolzhskiy State University of telecommunicztions and informatics
443110, Russia, Samara, M.Shakurskiy@psuti.ru

Abstract. The idea behind developing a device for recording the zero radial velocity of an object is to increase the device's resolution by using self-oscillators operating in a high-sensitivity mode, thereby reducing the error in determining the instant the object passes a point in space with zero radial velocity. A digital implementation of the system is also being considered.

Keywords: self-oscillating system, zero radial velocity of an object, Doppler effect, measurement accuracy, hypersensitivity effect, nonlinear amplifier, time stamp.

ВВЕДЕНИЕ

Задача определения пространственных координат объекта представляет собой одну из типовых и распространенных задач радиолокации, которая решается с помощью эффекта Доплера. При этом повышение точности измерений является фундаментальной задачей радиолокации. В работе используется эффект повышенной чувствительности, возникающий в трехчастотных автоколебательных системах [1–4]. Использование данного эффекта для усиления девиации частоты Доплера позволяет сжать во времени всплеск выходного сигнала при нулевой частоте Доплера и уточнить момент достижения объектом нулевой радиальной скорости.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для проверки гипотезы о повышении точности измерения момента времени достижения объектом нулевой радиальной скорости выполнено моделирование в среде MATLAB Simulink [5–11]. Структурная схема устройства изображена на рис. 1. Устройство содержит преобразователь девиации частоты периодического сигнала 1 [9, 12], умножитель частоты 2 и блок формирования метки времени 3.

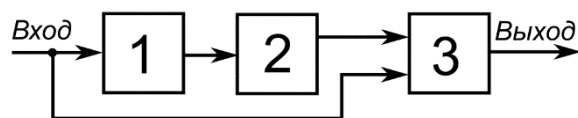


Рис. 1. Структурная схема устройства

Достоинством устройства является то, что, при использовании усилителя девиации частоты, для фиксации нулевой радиальной скорости объекта не требуется опорный сигнал, так как в момент прохождения точки с нулевой радиальной скоростью объектом частота отраженного сигнала не отличается от частоты опорного сигнала.

За счет усиления девиации частоты происходит сжатие во времени импульса выходного сигнала синхронного детектора в момент равенства частот. Это позволяет существенно увеличить точность определения момента времени

прохождения объектом точки с нулевой радиальной скоростью относительно наблюдателя.

ВЫВОДЫ

Результаты исследования модели подтверждают эффективность применения автоколебательных систем в режиме повышенной чувствительности для определения времени достижения объектом нулевой радиальной скорости. Разработанное устройство позволяет уменьшить погрешность определения момента времени прохождения объектом точки в пространстве с нулевой радиальной скоростью по отношению к наблюдателю.

Список источников

1. Иванов В. В., Шакурский, В. К. Генераторные фазовые и частотные преобразователи и модуляторы. Москва : Радио и связь. 2003. 184 с.
2. Иванов В. В., Шакурский В. К., Шакурский М. В. Моделирование виртуальных автоколебательных систем в режиме повышенной чувствительности с использованием цифровых фильтров // Школа университетской науки: парадигма развития. 2011. № 1 (2). С. 66–72.
3. Иванов В. В., Шакурский В. К., Шакурский, М. В. Синтез цифровых фильтров для генераторных преобразователей повышенной чувствительности // Известия высших учебных заведений: Приборостроение. 2012. Т. 55, № 7. С. 28–31.
4. Иванов В. В., Шакурский М. В. Цифровые фильтры частотной выборки. Самара : СНЦ РАН, 2012. 106 с. ISBN 978-5-93424-640-3.
5. Шакурский В. К., Шакурский М. В. Частотная неустойчивость и срыв автоколебаний в цифровых генераторах с нетипичной фазочастотной характеристикой // Радиотехника. 2025. Т. 89, № 2. С. 129–135.
6. Шакурский М. В. Настройка фазочастотной характеристики цифровых фильтров с конечной импульсной характеристикой независимо от амплитудно-частотной характеристики // Радиотехника. 2024. Т. 88, № 12. С. 119–126.
7. Шакурский В. К., Шакурский М. В. Математическая модель цифровых фильтров, реализуемых методом частотной выборки // Вектор науки ТГУ. 2011. № 2 (16). С. 98–100.

8. Патент № 234843 Российская Федерация, МПК G01S 13/42; G01S 13/58; G01S 13/586; H03C 3/06; H03D 7/16. Устройство фиксации нулевой радиальной скорости объекта : заявл. 16.04.2025 : опубл. 11. 06. 2025 / Шакурский М. В. // Роспатент : сайт. URL: https://searchplatform.rospatent.gov.ru/doc/RU234843U1_20250611?q=&from=search_simple&hash=1761818651 (дата обращения: 15.10.2025).

9. Патент №109941 Российская федерация, МПК H03D 7/16. Устройство для преобразования девиации частоты периодического сигнала : № 2011108082/08 : заявл. 02.03.2011 : опубл. 27.10.2011 / Воловач В. И., Иванов В. В., Шакурский В. К., Шакурский М. В. // Роспатент : сайт. URL: https://searchplatform.rospatent.gov.ru/doc/RU109941U1_20111027?q=&from=search_simple&hash=-1482900559 (дата обращения: 15.10.2025).

10. Шакурский М. В. Предкоррекция фазочастотной характеристики цифровых фильтров. DOI: 10.18469/ikt.2024.22.1.07 // Инфокоммуникационные технологии. 2024. Т. 22, № 1. С. 58–64.

11. Артюшенко В. М., Воловач В. И., Аббасова Т. С. Измерения частоты и фазы неизвестного сигнала на основе цифрового алгоритма // Двойные технологии. 2025. № 2(111). С. 41–43.

12. Патент № 221361 U1 Российская Федерация, МПК G06F 17/14. Цифровой фильтр с предкоррекцией фазочастотной характеристики : № 2023125738 : заявл. 09.10.2023 : опубл. 02.11.2023 / М. В. Шакурский ; заявитель ФГБОУ ВО ПГУТИ // Роспатент : сайт. URL: https://searchplatform.rospatent.gov.ru/doc/RU221361U1_20231102?q=&from=search_simple&hash=-1790638599 (дата обращения: 15.10.2025).

**МЕТОД ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ПСЕВДОСЛУЧАЙНЫХ
ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ НА ОСНОВЕ ХАРАКТЕРИСТИК
СТОХАСТИЧЕСКОЙ МАТРИЦЫ**

ШАЛАГИН Сергей Викторович, доктор технических наук,
доцент, профессор кафедры компьютерных систем
*Казанский национальный исследовательский
технический университет им. А. Н. Туполева
420111, Россия, Казань, sshalagin@mail.ru*

ДАНИЛОВ Дмитрий Александрович, аспирант
*Казанский национальный исследовательский
технический университет им. А. Н. Туполева
420111, Россия, Казань, mr.dmitry151@gmail.com*

Аннотация. Модифицирован и исследован известный метод оценки качества псевдослучайной последовательности (ПСП). Модификация метода основана на анализе характеристик стохастической матрицы (СМ), построенной на основе укрупнения множества элементов ПСП: энтропии и автокорреляции. Предложены различные способы укрупнения анализируемой ПСП с целью построения СМ.

Ключевые слова: псевдослучайная последовательность, качество, стохастическая матрица, энтропия, автокорреляция.

**METHOD FOR ASSESSING THE PSEUDO-RANDOM
SEQUENCES QUALITY BASED ON THE CHARACTERISTICS
OF A STOCHASTIC MATRIX**

SHALAGIN Sergei Viktorovich, Doctor of Engineering Sciences,
Associate Professor, Professor at the Department of Computer Systems
*Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev
420111, Russia, Kazan, sshalagin@mail.ru*

DANILOV Dmitriy Aleksandrovich, PhD student
*Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev
420111, Russia, Kazan, mr.dmitry151@gmail.com*

Abstract. A well-known method for evaluating the quality of a pseudo-random sequence (PRS) has been modified and investigated. The method is based on the analysis of the characteristics of a stochastic matrix (SM) constructed by aggregating a set of PRS elements: entropy and autocorrelation. Various methods of enlarging the analyzed PRS are proposed in order to construct the SM.

Keywords: pseudo-random sequence, quality, stochastic matrix, entropy, autocorrelation.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время существует множество методов анализа характеристик псевдослучайных последовательностей (ПСП) [1–9], применяемых при решении различных задач [10–13]. Известен метод анализа ПСП на основе критерия энтропии простой цепи Маркова [14]. Метод основан на оценке близости закона распределения ПСП, n -разрядных двоичных чисел, к равномерному согласно указанному критерию с точностью, пропорциональной длине $N = 2^n - 1$, анализируемой ПСП. В данном методе остается открытым вопрос: каким способом следует производить укрупнение множества из N состояний анализируемой ПСП с целью получения стохастической матрицы (СМ) размером $m \times m$, где m – целочисленное значение, наиболее приближенное к величине $\sqrt{N}$. В работе решена задача оценки влияния способа укрупнения ПСП на величину энтропии СМ, получаемой на ее основе согласно известному методу [14], а также на величину автокорреляции состояний цепи Маркова, реализуемой на основе СМ.

Предложенный в работе модифицированный метод анализа ПСП ограничен величиной их периода, не превышающего $2^n - 1$, для четных значений n : $n \bmod 2 = 0$. Величина $m = 2^{n/2}$. В данной работе ограничимся рассмотрением способов разбиения на подмножества ПСП Фибоначчи и Галуа, M -последовательностей, с периодом $N = 2^n - 1$. Состояния ПСП как упорядоченное множество целых чисел $X: x_i \in [0, N]$ разбиваются на m групп $\{G_1 \dots G_m\}$, для которых: 1) $\forall i \in \{1, \dots, m\}: |G_i| = m$; 2) $\forall i, j \in \{1, \dots, m\}, i \neq j: |G_i| \cap |G_j| = \emptyset$; 3)

$\cup_{i=1}^m |G_i| = X$; 4) $\forall j \in \{1, \dots, m\}, \forall d \in \{1, \dots, m-1\}, \forall x_i \in G_j: x_d < x_{d+1}$. Разбиение, реализуемое функцией

$$\delta: x_k \rightarrow y_j, \quad (1)$$

где для $x_k \in G_j, k = \overline{0, 2^n - 1}$, ставится в соответствие элемент $Y: y_j, j \in \{1, \dots, m\}, |Y| = |X|$. Функцию (1), удовлетворяющую условиям 1) – 4), зададим m различными способами. Способ 1: подмножествами по m элементов; способ 2: подмножествами по $(m-1)$ -му элементу, оставшиеся элементы распределяем по одному в группы $\{G_1 \dots G_m\}$; ... способ j : группами по $(m-j+1)$ элементов, $j = \overline{1, m-1}$, оставшиеся элементы распределяем по $m \bmod (m-j+1)$ в группы $\{G_1 \dots G_m\}$; ... способ m : элементы распределяем по одному в группы $\{G_1 \dots G_m\}$. Согласно свойствам 1) – 4) каждому элементу $X, x_k \in G_j, k = \overline{0, 2^n - 1}$, ставится в соответствие элемент $Y: y_{j-1}, |Y| = |X|$.

Замечание. Нулевой элемент в M -последовательностях отсутствует, но модифицированный метод анализа позволяет работать с ПСП периода 2^n ; например, с ПСП де Брейна [1, 3, 9].

Автокорреляция цепи Маркова с шагом $\tau = \overline{0, m-1}$, порождаемой СМ, вычисленной на основе ПСП Y , вычисляется согласно формуле:

$$K_m(\tau) = m^{-1} \sum_{i=0}^{m-1} p_{i \times (i+\tau) \bmod m}, \quad (2)$$

где $p_{i \times j}$ элементы СМ, $\forall i, j \in \{0, \dots, m-1\}$.

РЕЗУЛЬТАТЫ. На вход предложенного модифицированного метода подаётся ПСП периода не более 2^n , которая включает в себя неповторяющиеся n -разрядные двоичные числа, $n: n \bmod 2 = 0$; определяется размерность СМ, $m = 2^{n/2}$ и способ разбиения ПСП на группы $\{G_1 \dots G_m\}$, удовлетворяющий свойствам 1) – 4). Метод включает в себя три этапа. Этап 1: согласно (1) ПСП X ставится в соответствие последовательность Y . Этап 2: на основе ПСП Y вычисляем СМ размера $m \times m$ и предельный вектор $\pi_f, |\pi_f| = m$, отображающий частоту появления элементов y_j в $Y, j = \overline{1, m}$ [14]. Этап 3: по вычисленным π_f и СМ получаем значение энтропии СМ согласно известной формуле [15], а также вычисляем автокорреляцию для СМ при $\tau = \overline{0, m-1}$ согласно (2).

ВЫВОДЫ

Показано, что критерии энтропии и автокорреляции, вычисленные по СМ, позволяют оценивать приближение статистических свойств анализируемой ПСП к равномерному закону случайной последовательности с точностью, пропорциональной величине N^{-1} , длине анализируемой ПСП.

Список источников

1. Стельмашенко Б. Г., Тараненко П. Г. Нелинейные псевдослучайные последовательности в широкополосных системах передачи информации // Зарубежная радиоэлектроника. 1988. № 12. С. 3–16.
2. Кнут Д. Э. Искусство программирования для ЭВМ. В 7-х т. Т. 2. Москва : Мир, 1977. 723 с.
3. Иванов М. А., Чугунков И. В. Теория, применение и оценка качества генераторов псевдослучайных последовательностей. Москва : КУДИЦ-ОБРАЗ, 2003. 240 с. ISBN 5-93378-056-1.
4. Песошин В. А., Кузнецов В. М. Генераторы псевдослучайных и случайных чисел на регистрах сдвига. Казань: Изд-во КГТУ им. А.Н. Туполева, 2007. 296 с. ISBN 978-5-7579-0998-1.
5. Статистическая проверка случайности двоичных последовательностей методами NIST // Habr : сайт. URL: <https://habr.com/ru/company/securitycode/blog/237695/> (дата обращения 25.11.2025).
6. Brown R. G., Eddelbuettel D., Bauer D. Dieharder. A Random Number Test Suite. Version 3.31.1. URL: <http://webhome.phy.duke.edu/~rgb/General/dieharder.php> (дата обращения 25.11.2025).
7. Захаров В. М., Шалагин С. В., Эминов Б. Ф. Автоматные марковские модели над конечным полем : монография. Казань : Изд-во КНИТУ-КАИ, 2022. 328 с. URL: <https://e.lanbook.com/book/366542> (дата обращения: 20.10.2025). ISBN 978-5-7579-2644-5.
8. Захаров В. М., Шалагин С. В., Нурутдинова А. Р. Синтез и анализ стохастических матриц на основе автоматных моделей : учеб. пособие. Казань: Изд-во КНИТУ-КАИ, 2021. 106 с. ISBN 978-5-7579-2563-9.

9. Хачатрян Л. Г. Методы построения последовательностей де Брейна // Дискретная математика. 1991. Т. 3, Вып. 4. С. 62–78. URL: <https://www.mathnet.ru/rus/dm823> (дата обращения 25.11.2025).

10. Шалагин С. В. Решение задачи коммивояжёра методом статистических испытаний при использовании сложных цепей Маркова // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Физ.-матем. науки. 2024. Т. 166, кн. 4. С. 639–650. URL: <https://doi.org/10.26907/2541-7746.2024.4.639-650> (дата обращения: 20.11.2025).

11. Захаров В. М., Шалагин С. В., Гумиров А. И. Генератор дискретной случайной величины с заданным законом распределения в архитектуре ПЛИС/FPGA // Вестн. ДГУ. Сер. 1. Естеств. науки. 2023. Т. 38, № 3. С. 28–33. URL: <https://doi.org/10.21779/2542-0321-2023-38-3-28-33> (дата обращения: 20.11.2025).

12. Zakharov V. M., Shalagin S. V., Eminov B. F. Representing Autonomous Probabilistic Automata by Minimum Characteristic Polynomials over a Finite Field. DOI https://doi.org/10.1007/978-981-16-1480-4_19 // Futuristic Trends in Network and Communication Technologies. FTNCT 2020. Communications in Computer and Information Science. 2021. Vol. 1395. P. 215–224.

13. Захаров В. М., Шалагин С. В. Реализация генератора дискретной случайной величины на основе d-арного дерева // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Физ.-матем. науки. 2025. Т. 167, № 3. С. 507–518. URL: <https://doi.org/10.26907/2541-7746.2025.3.507-518> (дата обращения: 20.11.2025).

14. Zakharov V. M., Shalagin S. V. A Method for Analyzing Repetitive Pseudorandom Sequences by the Criterion of Markov Chain Entropy. DOI: 10.1134/S1995080223020385 // Lobachevskii Journal of Mathematics. 2023. Vol. 44, No. 2. P. 768–775.

15. Хинчин А. Я. Понятие энтропии в теории вероятностей // Успехи математических наук. 1953. Т. VIII, № 3 (55). С. 3–20. URL: <https://www.mathnet.ru/rus/rm8203> (дата обращения: 20.11.2025). Доступна на портале Math-Net.Ru.

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА СТАТИСТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ
ДЛЯ РЕШЕНИЯ МНОЖЕСТВЕННОЙ ЗАДАЧИ
КОММИВОЯЖЕРА С ОДНИМ ДЕПО**

ШАЛАГИН Сергей Викторович, доктор технических наук,
доцент, профессор кафедры компьютерных систем
*Казанский национальный исследовательский
технический университет им. А. Н. Туполева
420111, Россия, Казань, sshalagin@mail.ru*

КАСЫМОВА Диана, студентка
*Казанский национальный исследовательский
технический университет им. А. Н. Туполева
420111, Россия, Казань, kasymova.dk28@gmail.com*

Аннотация. Предложен метод решения множественной задачи коммивояжера при использовании метода статистических испытаний. Получены оценки сложности данного метода в зависимости от количества пунктов и числа коммивояжеров.

Ключевые слова: множественная задача коммивояжера, приближённый метод, статистические испытания, оценки сложности.

**THE STATISTICAL TESTING METHOD APPLICATION TO SOLVE
THE TRAVELLING SALESMAN PROBLEM WITH ONE DEPO**

SHALAGIN Sergei Viktorovich, Doctor of Engineering Sciences,
Associate Professor, Professor at the Department of Computer Systems
*Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev
420111, Russia, Kazan, sshalagin@mail.ru*

KASYMOVA Diana, student
*Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev
420111, Russia, Kazan, kasymova.dk28@gmail.com*

Abstract. A method for solving the multiple traveling salesman problem using statistical testing is proposed. Estimates of the method's complexity are obtained depending on the number of locations and the number of traveling salesmen.

Keywords: multiple traveling salesman's problem, approximate method, statistical tests method, complexity estimates.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из важных задач комбинаторики является задача коммивояжера (KB), или задача о странствующем торговце (TSP). Задача сводится к поиску пути, который проходит через промежуточные пункты по одному разу, возвращаясь в исходную точку (депо), и является оптимальным по критерию, учитывающему минимальное время поездки, минимальные расходы на дорогу и/или минимальную длину пути. Критерии выгодности маршрута из одного пункта в другой задаются матрицей T размера n на n , в общем случае – асимметричной. Множественная TSP (MTSP) является обобщением TSP, в которой допускается более одного KB и более одного депо. TSP и MTSP считаются NP-сложными задачами, т. е. время, необходимое для поиска оптимального решения, увеличивается экспоненциально по мере роста числа пунктов n [1–3]. Существуют различные методы решения MTSP, в общем случае сводимой к множеству TSP [4]: полного перебора (грубой силы), ветвей и границ, случайного перебора, жадного алгоритма и др. Особое значение эвристические алгоритмы имеют для решения TSP и MTSP методами Монте-Карло (ММК). ММК в сочетании с эвристическими методами является одним из самых мощных средств решения задачи большого размера; при этом не предъявляется жестких требований к памяти и быстродействию компьютера. Отметим, что проблема запоминания больших массивов промежуточной информации при решении TSP и MTSP другими методами является одной из самых острых [1, с. 24–25].

В [5] дано обоснование решения TSP при использовании известного математического аппарата сложных цепей Маркова [6]. Вопросы генерирования марковских последовательностей большого объема с заданным законом распределения являются актуальными [7, 8]. Применение ММК для решения различных задач анализа также является актуальным [9–13] в связи с бурным развитием вычислительной техники, допускающей распределенные вычисления, которые находят применение при решении широкого класса актуальных задач науки и техники [14–15]. В работе предложен метод решения MTSP с одним депо (MTSP1) при использовании ММК (далее – Метод), получены оценки временной

и аппаратной сложности реализации данного метода в зависимости от количества пунктов n и количества проводимых испытаний N .

РЕЗУЛЬТАТЫ

На входе Метода – полная матрица $T_{n \times n}$, на выходе – f максимальных частот появления множеств V путей k KB, $k \geq 2$. Всевозможные варианты множеств V сохраняем в структуре данных M , включающей $k \cdot \lceil n/k \rceil \cdot \lceil \log_2 n \rceil$ элементов, значения элементов принадлежат интервалу $[0, N]$. Метод включает четыре этапа.

Этап 1: получение эргодической стохастической матрицы $P_{n \times n}$, элементы которой нормированы по строкам и обратно пропорциональны величине выгоды, задаваемой элементами T .

Этап 2: для каждого из k KB, $z = \overline{1, k}$,

2.1) генерирование участков путей между соседними пунктами, из a_{zi} в a_{zj} , на основе вероятностного закона, заданного i -й строкой P ; $L_i = (p_{i1}, \dots, p_{in})$;

2.2) удаление a_{zj} из списка пунктов, удаление из L_i элемента p_{ij} , нормирование L_i : $\sum_{b=1}^n p_{ib} = 1$;

2.3) повтор пп. 2.1) и 2.2), пока не будут пройдены все пункты и k KB не вернутся в депо;

2.4) сохранение множества V из k путей в виде k структур данных типа список, базирующихся на одном массиве длины n .

Этап 3: инкремент элемента структуры M , которая соответствует множеству V , сгенерированному на этапе 2.4). Этап 4: если проведено достаточное количество испытаний N , то ранжируем частоты в M в порядке убывания, выдаем f первых элементов и завершаем Метод; иначе – этап 2.

ВЫВОДЫ

Для хранения структуры M требуется память размера $k \cdot \lceil n/k \rceil \cdot \lceil \log_2 n \rceil$ на N ; для хранения V на этапе 2 требуется массив из n элементов с полями данных и адреса равной длины, по $\lceil \log_2 n \rceil$ двоичных разрядов; объем V не зависит от k . Пп. 2.1) и 2.2) Метода выполняются $k \cdot N$ раз, но выполнение этапов 2 и 3 из-за особенностей ММК может быть распараллелено.

Список источников

1. Мудров В. М. Задача о коммивояжере. Москва: Знание, 1969. 64 с. URL: https://www.mathedu.ru/text/mudrov_zadacha_o_kommivoyazhere_1969 (дата обращения: 20.10.2025). Доступна на сайте Математическое образование.
2. Алгоритм для решения задачи о коммивояжере / К. Кэрел и др. // Экономика и математические методы. 1965. Т. 1, Вып. 1. С. 94–107.
3. Quang T. L., Aibin M. Traveling Salesman Problem: Exact solutions vs. Heuristic vs. Approximation algorithms // Baeldung : сайт. 2024. URL: <https://www.baeldung.com/cs/tsp-exact-solutions-vs-heuristic-vs-approximation-algorithms> (дата обращения: 20.10.2025).
4. Меламед И. И., Сергеев С. И., Сигал И. Х. Задача коммивояжера. Приближенные алгоритмы // Автоматика и телемеханика. 1989. № 11. С. 3–26. URL: <https://www.mathnet.ru/rus/at6463> (дата обращения: 20.10.2025). Доступна на портале Math-Net.Ru.
5. Шалагин С. В. Решение задачи коммивояжера методом статистических испытаний при использовании сложных цепей Маркова. DOI: <https://doi.org/10.26907/2541-7746.2024.4.639-650> // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Физ.-матем. науки. 2024. Т. 166, кн. 4. С. 639–650.
6. Захаров В. М., Шалагин С. В., Эминов Б. Ф. Автоматные марковские модели над конечным полем : монография. Казань : Изд-во КНИТУ-КАИ, 2022. 328 с. URL: <https://e.lanbook.com/book/366542> (дата обращения: 20.10.2025). Доступна в рамках проекта СЭБ.
7. Захаров В. М., Шалагин С. В., Гумиро, А. И. Генератор дискретной случайной величины с заданным законом распределения в архитектуре ПЛИС/FPGA. DOI: 10.21779/2542-0321-2023-38-3-28-33 // Вестн. ДГУ. Сер. 1: Естеств. науки. 2023. Т. 38, № 3. С. 28–33.
8. Zakharov V. M., Shalagin S. V., Eminov B. F. Representing Autonomous Probabilistic Automata by Minimum Characteristic Polynomials over a Finite Field. DOI: 10.1007/978-981-16-1480-4_19. // Communications in Computer and Information Science. 2021. Vol. 1395. P. 215–224.

9. Захаров В. М., Шалагин С. В. Реализация генератора дискретной случайной величины на основе d-арного дерева // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Физ.-матем. науки. 2025. Т. 167, № 3. С. 507–518. URL: <https://doi.org/10.26907/2541-7746.2025.3.507-518> (дата обращения: 20.10.2025).

10. Шалагин С. В. Вычисление полиномов заданной степени на стохастических ЭВМ // Информационные технологии. Радиоэлектроника. Телекоммуникации (ITRT-2024) : сб. тез. докл. Тольятти : ПВГУС, 2025. С. 347–352.

11. Шалагин С. В., Нурутдинова А. Р. Реализация модифицированного метода Рабинера для множества стохастических матриц на нейронных сумматорах // Интеллектуальные системы. Теория и приложения. 2022. Т. 26, № 1. С. 129–132.

12. Нурутдинова А. Р., Шалагин С. В. Применение модифицированного алгоритма «прямого-обратного хода» для идентификации цепей Маркова // Информационные технологии и нанотехнологии (ИТНТ-2021) : сб. тр. по материалам VII Междунар. конф. и молодежн. шк. Т. 3. Самара : Изд-во Самар. ун-та, 2021. С. 030782. URL: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://repo.ssau.ru/jspui/bitstream/123456789/11757/1/65paper030782.pdf> (дата обращения: 20.10.2025). Доступна на сайте Репозиторий Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королёва.

13. Шалагин С. В., Нурутдинова А. Р. Стохастическая идентификация таблицы «Объект-признак» на основе модифицированного метода Рабинера // 19-я Междунар. конф. «Авиация и космонавтика» : тезисы. Москва : Перо, 2020. С. 629–631.

14. Гибадуллин Р. Ф., Вершинин И. С. Состояние и перспективы развития ассоциативной стеганографии // Математические методы в технологиях и технике. 2024. № 11. С. 107–111.

15. Гибадуллин Р. Ф., Хабибуллин Р. Р. Реализация криптографического алгоритма AES на основе различных технологий распараллеливания. DOI: 10.34755/IROK.2022.21.21.007 // Современные стратегии и цифровые трансформации устойчивого развития общества, образования и науки : сб. материалов IV Междунар. науч.-практ. конф. Москва : Алеф, 2022. С. 178–184.

САМООРГАНИЗУЮЩИЕСЯ КАРТЫ В СИСТЕМАХ ОБНАРУЖЕНИЯ ВТОРЖЕНИЙ

ШТЕРЕНБЕРГ Станислав Игоревич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры ЗСС

*Санкт-Петербургский государственный университет
телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича
193232, Россия, Санкт-Петербург, shterenberg.si@sut.ru*

ЗУЕВ Дмитрий Павлович, магистрант

*Санкт-Петербургский государственный университет
телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича
193232, Россия, Санкт-Петербург, zuev.dp@sut.ru*

Аннотация. Изложены вопросы использования методов машинного обучения в системах обнаружения вторжений. Особое внимание уделено классифицированию IDS и росту необходимости поиска аномалий. Кратко описаны преимущества самоорганизующихся карт Кохонена для кластеризации сложных данных. Приведены примеры отечественных и открытых IDS, в которые могут быть внедрены SOM-модули для повышения качества обнаружения аномалий. Рассмотрены последние исследования, демонстрирующие использование SOM в гибридных решениях и примеры их эффективности.

Ключевые слова: система обнаружения вторжений, аномалия, самоорганизующаяся карта, нейросетевой анализ, машинное обучение.

SELF-ORGANIZING MAPS IN INTRUSION DETECTION SYSTEMS

STERENBERG Stanislaw Igorevich, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of ZSS

*St. Petersburg State Telecommunications University
by prof. M. A. Bonch-Bruevich
193232, Russia, St. Petersburg, shterenberg.si@sut.ru*

ZUEV Dmitry Pavlovich, Master's student

*St. Petersburg State Telecommunications University
by prof. M. A. Bonch-Bruevich
193232, Russia, St. Petersburg, zuev.dp@sut.ru*

Abstract. This paper addresses the use of machine learning methods in intrusion detection systems. Special attention is given to IDS classification and the increasing need for anomaly detection. The advantages of Kohonen self-organizing maps for clustering complex data are briefly described. Examples of domestic and open-source IDS into which SOM modules can be integrated to enhance anomaly detection are provided. Recent studies demonstrating the use of SOM in hybrid solutions and examples of their effectiveness are discussed.

Keywords: intrusion detection system, anomaly, self-organizing map, neural analysis, machine learning.

ВВЕДЕНИЕ

Система обнаружения вторжений (IDS) определяется как программный продукт или устройство для выявления несанкционированной вредоносной активности в компьютерной сети или на отдельном хосте.

С ростом объемов данных классические сигнатурные методы обнаружения становятся малоэффективны, поэтому в последние годы активно исследуются методы машинного обучения и интеллектуального анализа данных. Нейронные сети как методы кластеризации и классификации трафика позволяют обнаруживать новые неизвестные атаки на основе выявления аномального поведения. Одним из популярных методов неконтролируемого обучения является самоорганизующаяся карта Кохонена (SOM). Это нейронная сеть, которая проецирует многомерные данные на двумерную топологическую сетку, сгруппировывая похожие образцы. Применение SOM в IDS позволяет обнаруживать отклонения, которые трудно формализовать сигнатурно.

В данном тезисе рассматриваются возможности внедрения механизмов SOM в различные IDS. В первую очередь перечисляются отечественные решения IDS/IPS, в которые теоретически можно интегрировать SOM-модули для анализа трафика. Для сравнения упоминаются известные open-source IDS, которые позволяют расширять функционал дополнительными модулями анализа. Отмечено, что современные IDS все чаще используют гибридные архитектуры с ML-компонентами.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Рассмотрены примеры научных исследований по использованию SOM в IDS. В работе Долгачёва М. В. предложен метод обнаружения атак на веб-приложение, где SOM используется на этапе анализа HTTP-запросов. Авторы показали, что карта Кохонена эффективно выявляет векторы атак и попытки эксплуатации уязвимостей с низкой вычислительной нагрузкой. Интеграция SOM в систему уровня WAF продемонстрировала перспективность применения нейросетевого анализа для защиты веб-приложений.

Другой пример – гибридные IDS, сочетающие разные методы ИИ. Васильев В. И. предложили интеллектуальную систему, где первый уровень анализа выполняет искусственная иммунная система для отсева нормальных соединений, а второй уровень – кластеризацию аномалий с помощью SOM. В этой схеме SOM группирует отклоняющиеся сетевые пакеты в кластеры схожих признаков после предварительной фильтрации иммунными детекторами. Подобные гибридные подходы с SOM показывают высокую эффективность в обнаружении DoS-атак и других вредоносных действий при небольшом уровне ложных срабатываний.

Для открытых IDS существуют примеры интеграции ML-модулей. Например, с помощью IsolationForest настраивают обнаружение аномалий в различных протоколах, после чего результаты объединяют во «вторичные» аномалии общесистемного поведения. Это показывает, что в подобных open-source системах возможно добавление новых модулей анализа на основе нейросетей и SOM.

Таким образом, анализ литературы за последние годы показывает, что внедрение SOM в IDS позволяет расширять возможности обнаружения неизвестных атак и аномалий. Стандартные сигнатурные IDS могут обогащаться нейросетевыми модулями для анализа отклонений. Подобные подходы демонстрируют, как SOM может работать совместно для более надежного обнаружения атак.

ВЫВОДЫ

Проведенный обзор показал, что самоорганизующиеся карты Кохонена являются эффективным инструментом для анализа сетевого трафика и выявления

аномалий. Среди open-source решений Suricata, Snort и другие могут быть дополнены модулями на базе SOM без существенных изменений инфраструктуры, так как они уже строят гибкую архитектуру обработки событий. Итоги исследований свидетельствуют о перспективности интеграции самоорганизующихся карт в IDS различного типа: как в корпоративные отечественные продукты, так и в свободно распространяемые системы. Это позволяет повысить скорость и точность обнаружения сложных атак, особенно атипичных и распределенных.

Список источников

1. Гибридная интеллектуальная система обнаружения атак на основе комбинации методов машинного обучения / В. И. Васильев, А. М. Вульфин, В. Е. Гвоздев, Р. Р. Шамсутдинов. DOI: 10.26102/2310-6018/2021.34.3.019 // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2021. Т. 9, № 3. С. 13–21.
2. Долгачёв М. В., Москвичёв А. Д., Москвичева К. С. Обнаружение атак на веб-приложение с помощью самоорганизующейся карты Кохонена. DOI: 10.21681/2311-3456-2024-1-38-44 // Вопросы кибербезопасности. 2024. № 1 (59). С. 38–44.
3. Как мы анализируем сетевые аномалии с помощью Suricata и машинного обучения // Хабр : сайт. URL: <https://habr.com/ru/articles/927240/> (дата обращения: 23.11.2025).
4. Высоцкий А., Чуянов В. Идентификация хакерских атак на базе искусственного интеллекта и применение в межсетевых экранах нового поколения // Хабр : сайт. URL: <https://habr.com/ru/articles/853940/> (дата обращения: 23.11.2025).
5. Creating an Explainable Intrusion Detection System Using Self Organizing Maps / J. Ables et al. DOI: 10.1109/SSCI51031.2022.10022255 // IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI). 2022. P. 404-412.
6. Intrusion Detection in NSL-KDD Dataset Using Hybrid Self-Organizing Map Model / N. Iftikhar et al. DOI: 10.32604/cmcs.2025.062788 // Computer Modeling in Engineering & Sciences. 2025. 143(1):639-671.

7. A Survey on the Development of Self-Organizing Maps for Unsupervised Intrusion Detection / Qu X. et al. DOI: 10.1007/s11036-019-01353-0 // Mobile Networks and Applications. 2021. Vol. 26, P. 808–829. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11036-019-01353-0> (дата обращения: 23.11.2025).

ОГРАНИЧЕНИЯ И МОДЕРНИЗАЦИЯ SIEM-СИСТЕМ В УСЛОВИЯХ ВНУТРЕННИХ УГРОЗ

ШТЕРЕНБЕРГ Станислав Игоревич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры ЗСС

*Санкт-Петербургский государственный университет
телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича
193232, Россия, Санкт-Петербург, shterenberg.si@sut.ru*

ПОТЕМКИНА Юлия Фёдоровна, магистрант
*Санкт-Петербургский государственный университет
телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича
193232, Россия, Санкт-Петербург, potemkina.uf@sut.ru*

Аннотация. В статье рассматривается проблема недостаточной эффективности SIEM-систем при обнаружении инцидентов, инициированных внутренними нарушителями. Показано, что традиционные подходы не учитывают контекст жизненного цикла программного обеспечения и не обеспечивают контроль семантической целостности. Предложен подход к модернизации SIEM за счет интеграции с инфраструктурой разработки и применения агентской платформы Wazuh, что позволяет повысить точность выявления скрытых изменений в программном коде.

Ключевые слова: SIEM, внутренний нарушитель, целостность ПО, Wazuh, жизненный цикл ПО, поведенческий анализ.

LIMITATIONS AND MODERNIZATION OF SIEM SYSTEMS IN THE CONTEXT OF INSIDER THREATS

SHTERENBERG Stanislav Igorevich, Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor, Associate Professor at the Department of ZSS
*St. Petersburg State Telecommunications University
by prof. M. A. Bonch-Bruevich
193232, Russia, St. Petersburg, shterenberg.si@sut.ru*

POTEMKINA Iuliia Fedorovna, Master's student
*St. Petersburg State Telecommunications University
by prof. M. A. Bonch-Bruevich
193232, Russia, St. Petersburg, potemkina.uf@sut.ru*

Abstract. The article addresses the problem of insufficient effectiveness of SIEM systems in detecting incidents initiated by insider threats. It is shown that traditional approaches fail to account for the software development lifecycle context and do not ensure semantic integrity monitoring. A modernization approach is proposed, based on integration with the development infrastructure and the use of the Wazuh agent-based platform, which enhances the accuracy of detecting hidden modifications in application code.

Keywords: SIEM, insider threat, software integrity, Wazuh, software lifecycle, behavioral analysis.

ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение целостности программного обеспечения приобретает особую значимость на фоне роста инцидентов, инициированных внутренними нарушителями. В отличие от классических внешних атак, направленных на несанкционированное получение данных или временное нарушение доступности, действия сотрудников с легитимными привилегиями зачастую нацелены на скрытое искажение логики приложений, что может привести к долгосрочным последствиям, включая финансовые потери, нарушение регуляторного соответствия и потерю доверия со стороны клиентов. Такие инциденты особенно трудно обнаружить, поскольку злоумышленник использует доверенные инструменты и не выходит за рамки своих формальных полномочий. Традиционные SIEM-системы, несмотря на ключевую роль в защите, недостаточно эффективны против подобных угроз из-за архитектурных и методологических ограничений, мешающих корректной интерпретации нарушений семантической целостности.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Анализ типовых сценариев показывает, что внутренние нарушители чаще всего действуют на этапах разработки и сопровождения программного обеспечения, используя штатные инструменты для внесения скрытых изменений. Например, сотрудник может внедрить в код условие, срабатывающее в определенную дату, или изменить логику обработки финансовых операций, не затрагивая структуру исполняемого файла. Традиционная система централизованного сбора

и анализа событий фиксирует лишь факт обновления компонента или изменения файла, но не может определить, было ли оно санкционировано и безопасно с точки зрения логики приложения. Для преодоления этого ограничения целесообразно расширить функциональность таких систем за счет интеграции с инфраструктурой разработки и применения агентских платформ мониторинга. В частности, система Wazuh, являющаяся решением с открытым исходным кодом, обеспечивает непрерывный контроль целостности файлов на конечных узлах, ведёт аудит системных вызовов и обнаруживает аномалии в реальном времени. Установленная на защищаемые хосты, она передает в систему анализа детализированные события, в частности, информацию о том, какой процесс инициировал изменение, какие файлы были затронуты и сопровождалось ли это активностью в системах автоматизированной сборки и развертывания. Это позволяет строить корреляционные правила, учитывающие не только факт модификации, но и ее контекст, например, генерацию инцидента при изменении исполняемого файла вне утвержденного графика обновлений или при активности разработчика в эксплуатационной среде без запроса на изменение. Такой подход обеспечивает переход от формального подтверждения неизменности файла к анализу его поведенческой корректности, то есть от структурного контроля к семантическому.

ВЫВОДЫ

Таким образом, современные системы централизованного сбора и анализа событий информационной безопасности требуют значительной модернизации для эффективного противодействия угрозам, исходящим изнутри организации и направленным на нарушение целостности программного обеспечения. Ключевые направления улучшения включают интеграцию с инструментами жизненного цикла программного обеспечения, внедрение механизмов анализа поведения привилегированных пользователей и применение агентских решений, таких как Wazuh, для получения детального контекста на уровне хоста. Предложенный подход позволяет не только повысить достоверность обнаружения скрытых инцидентов, но и значительно сократить время их расследования за счет автоматической привязки событий к этапам разработки, тестирования и развертывания.

Это особенно важно в условиях, когда угроза исходит не от внешних злоумышленников, а от технически квалифицированных сотрудников, использующих легитимные средства и процедуры для достижения злонамеренных целей. Внедрение подобных решений способствует формированию доверенной программной среды, что является необходимым условием обеспечения устойчивой и надёжной информационной безопасности в современных цифровых системах.

Список источников

1. Как Wazuh помог наладить круглосуточный мониторинг и реагирование на ИБ-события //Habr : сайт. URL: <https://habr.com/ru/companies/nubes/articles/778990/> (дата обращения: 14.11.2025).
2. Кривоногов С. В. Внедрение киберполигона в образовательный процесс // Управление образованием: теория и практика. 2024. Т. 14, № 10-1. С. 100–110.
3. Ланецкая А. Ю., Александрова Е. Н. Современные угрозы информационной безопасности // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2022. № 7-2 (70). С. 192–195.
4. Попов М. А., Жуков В. Г. Поведенческий анализ пользователей информационной системы // Актуальные проблемы авиации и космонавтики : сб. материалов VIII Междунар. науч.–практ. конф : в 3 т. Т 2. Красноярск, 2022. С. 295–297.
5. Стрижков В. А. Повышение эффективности выявления инсайдерской угрозы на основе метода моделирования поведения внутреннего нарушителя в организации // E-Scio.ru : электрон. науч. журнал. 2022. № 10 (73). 18 с. URL: <https://e-scio.ru/?m=202210&paged=4> (дата обращения: 16.11.2025).
6. Банк данных угроз безопасности информации / ФАУ «ГНИИИ ПТЗИ ФСТЭК России» : сайт. URL: <https://bdu.fstec.ru/> (дата обращения: 16.11.2025).
7. Шабля В. О., Коноваленко С. А., Едунов Р. В. Анализ процесса функционирования SIEM-систем // E-Scio.ru : электрон. науч. журнал. 2022. № 5. С. 284–295. URL: <https://e-scio.ru/?m=202205&paged=6> (дата обращения: 16.11.2025).

8. Штеренберг С. И., Данилова Ю. С. // Вестник Санкт-Петербургского гос. ун-та технологии и дизайна. Серия 1. Естественные и технические науки. 2020. № 3. С. 40–45.

9. Wazuh documentation: File integrity monitoring and security configuration assessment. Version 4.8. // Wazuh Inc. : сайт. 2024. URL: <https://documentation.wazuh.com/current/> (дата обращения: 17.11.2025).

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ БОЛЬШИХ ДАННЫХ В SIEM-СИСТЕМАХ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ МОНИТОРИНГА ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

ШТЕРЕНБЕРГ Станислав Игоревич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры ЗСС

*Санкт-Петербургский государственный университет
телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича
193232, Россия, Санкт-Петербург, shterenberg.si@sut.ru*

ШАРИФОВ Роман Геннадьевич, магистрант

*Санкт-Петербургский государственный университет
телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича
193232, Россия, Санкт-Петербург, sharifov.rg@sut.ru*

Аннотация. Представлены подходы к интеграции систем управления событиями и информацией безопасности с технологиями больших данных для решения задач масштабируемого мониторинга. Описана многоуровневая архитектура, обеспечивающая сбор, хранение и развитую аналитику журналов безопасности на базе кластерной Big Data-платформы. Показаны её преимущества для риск-ориентированного анализа инцидентов информационной безопасности и обозначены ключевые требования к инфраструктуре и компетенциям персонала.

Ключевые слова: большие данные, SIEM-системы, информационная безопасность, защита данных, мониторинг безопасности.

USE OF BIG DATA TECHNOLOGIES IN SIEM SYSTEMS TO ENHANCE THE EFFICIENCY OF INFORMATION SECURITY MONITORING

STERENBERG Stanislaw Igorevich, Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor, Associate Professor at the Department of ZSS

*St. Petersburg State Telecommunications University
by prof. M. A. Bonch-Bruevich
193232, Russia, St. Petersburg, shterenberg.si@sut.ru*

SHARIFOV Roman Gennadievich, Master's student

*St. Petersburg State Telecommunications University
by prof. M. A. Bonch-Bruevich
193232, Russia, St. Petersburg, sharifov.rg@sut.ru*

Abstract. The paper presents approaches to integrating security information and event management systems with big data technologies to support scalable monitoring. It describes a multi-layer architecture that provides collection, storage and advanced analytics of security logs on a clustered Big Data platform. The advantages of this architecture for risk-oriented incident analysis are demonstrated, and key requirements for the infrastructure and staff competencies are outlined.

Keywords: big data, SIEM systems, information security, data protection, security monitoring.

ВВЕДЕНИЕ

Цифровая трансформация и рост распределенных информационных систем приводят к увеличению объемов и разнообразия событий информационной безопасности, требующих анализа вблизи реального времени. Традиционные SIEM-системы на базе монолитной архитектуры и реляционных СУБД сталкиваются с ограничениями по масштабируемости и производительности, что снижает полноту и оперативность мониторинга. В публикациях рассматриваются применение технологий больших данных и методов интеллектуального анализа, а также защита Big Data-платформ. Однако комплексная интеграция SIEM и инфраструктуры больших данных для риск-ориентированного мониторинга изучена недостаточно. Цель работы состоит в анализе возможностей применения технологий больших данных в SIEM-системах и обосновании многоуровневой архитектуры их интеграции.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Предлагаемая интеграция SIEM и технологий больших данных основана на перераспределении функций между компонентами системы. Операции по приему телеметрии, долговременному хранению логов и первичной обработке переносятся в специализированный контур Big Data. Распределенное хранилище позволяет отказаться от жесткого сокращения данных и сохранить возможность ретроспективного анализа инцидентов на длительных интервалах, что важно при выявлении сложных атак и расследовании связанных событий.

Технологии больших данных создают основу для развитой аналитики. В рамках платформы формируются статистические и поведенческие модели, описывающие типичную активность пользователей и сервисов и позволяющие обнаруживать отклонения. Методы машинного обучения дополняют эти механизмы и ориентированы на поиск аномальных сочетаний признаков, которые трудно описать фиксированными правилами. Кластерный характер обработки делает возможным применение таких методов без критического снижения производительности даже при значительном росте объемов данных и числа источников.

Интеграция SIEM и Big Data трансформирует логическую архитектуру мониторинга. Источники событий подключаются к уровню сбора и транспортировки, где агенты и брокеры сообщений буферизуют и доставляют потоки телеметрии. Внутри платформы реализуются функции хранения и предварительной обработки, обеспечивающие унификацию форматов, обогащение контекстной информацией и подготовку признаков для анализа. Над этим уровнем формируется аналитический слой, реализующий корреляцию событий, поведенческий анализ и расчет показателей риска, а агрегированные результаты передаются в интерфейс SIEM для визуализации, настройки правил корреляции и планирования реагирования.

Такое разделение ответственности между слоями повышает масштабируемость и качество аналитики. Горизонтальное наращивание ресурсов Big Data-платформы позволяет подключать новые источники и выдерживать рост интенсивности событий, а совместная обработка сетевых потоков, системных журналов и данных о бизнес-процессах обеспечивает более широкий контекст и повышает точность выводов. Аналитический контур с большими объемами чувствительных данных становится ключевым активом и требует регламентов доступа, шифрования, резервного копирования и контроля целостности. На этой основе формируется риск-ориентированный мониторинг, при котором события оцениваются по влиянию на критичные ресурсы и бизнес-процессы, а SIEM, использующая возможности Big Data-платформы, становится инструментом поддержки управленческих решений.

ВЫВОДЫ

Применение технологий больших данных в системах управления событиями и информацией безопасности обеспечивает масштабируемый мониторинг, длительное хранение журналов и расширенную аналитику. Предложенная архитектура интеграции SIEM и Big Data повышает полноту и контекстность анализа и создает основу риск-ориентированного мониторинга. Одновременно возрастает значимость защиты аналитической платформы и компетенций персонала, что задает требования к развитию инфраструктуры и процессов управления информационной безопасностью. Результаты могут использоваться при проектировании и модернизации корпоративных систем мониторинга безопасности.

Список источников

1. Артамонов В. А., Артамонова Е. В. Искусственный интеллект и безопасность: проблемы, заблуждения, реальность и будущее // Россия: тенденции и перспективы развития. 2022. № 17, ч. 1. С. 585–594.
2. Букин А. В., Самонов А. В., Тихонов Э. И. Обнаружение инцидентов информационной безопасности на основе технологии нейронных сетей // Вопросы кибербезопасности. 2022. № 5 (51). С. 61–73.
3. Девцына С. Н., Пилькевич П. В. Обеспечение совместимости технических компонентов при создании системы мониторинга инцидентов информационной безопасности // Вопросы кибербезопасности. 2024. № 4 (62). С. 38–44.
4. Долгачев М. В., Костюнин В. А. Комплексный анализ поведения системы Windows для обнаружения киберугроз // Вопросы кибербезопасности. 2025. № 2 (66). С. 71–77.
5. Левшун Д. А. Модель комбинированного применения интеллектуальных методов корреляции событий информационной безопасности // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 11. С. 833–841.
6. Применение нейросетей для анализа больших данных в реальном времени / И. С. Макаров и др. // Программные системы и вычислительные методы. 2025. № 2. С. 132–147.

7. Полтавцева М. А., Зегжда Д. П., Калинин М. О. Многоуровневая концепция безопасности систем управления большими данными // Вопросы кибербезопасности. 2023. № 5 (57). С. 25–36. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/mnogourovnevaya-kontseptsiya-bezopasnosti-sistem-upravleniya-bolshimi-dannymi> (дата обращения: 20.11.2025). Доступна на сайте Cyberleninka.

8. Статьев В. Ю., Докучае, В. А., Маклачкова В. В. Информационная безопасность на пространстве «больших данных» // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2022. Т. 16, № 4. С. 21–28. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/informatsionnaya-bezopasnost-na-prostranstve-bolshih-dannyh> (дата обращения: 10.11.2025). Доступна на сайте Cyberleninka.

9. Alani M. Big data in cybersecurity: a survey of applications and future trends. DOI:10.1007/s40860-020-00120-3 // Journal of Reliable Intelligent Environments. 2021. Vol. 7, no. 2. P. 85–114.

10. Kumar D. Data Fortress: Innovations in Big Data Analytics for Proactive Cybersecurity Defense and Asset Protection. DOI:10.55248/gengpi.5.0624.1425 // International Journal of Research Publication and Reviews. 2024. Vol. 5, no. 6. P. 1026–1031.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОТОКОЛОВ QUIC, TCP И UDP ПРИ ПЕРЕДАЧЕ ФАЙЛОВ И ВИДЕОПОТОКОВ

ЯКУПОВ Денис Олегович, аспирант
*Поволжский государственный университет
телекоммуникаций и информатики
443010, Россия, Самара, d.yakupov@psuti.ru*

КАРТАШЕВСКИЙ Игорь Вячеславович, доктор технических
наук, доцент, профессор кафедры «Программная инженерия»
*Поволжский государственный университет
телекоммуникаций и информатики
443010, Россия, Самара, ivk@psuti.ru*

Аннотация. В работе проанализирована эффективность транспортных протоколов QUIC, TCP, TCP+TLS и UDP при передаче файлов и потокового видео. Оценка качества видеопотоков проводилась по метрикам SSIM, MSE и PSNR. QUIC показывает меньшие задержки при передаче файлов за счет быстрой установки соединения, отсутствия блокировки Head-of-Line и встроенной надежной доставки. При потоковой передаче видео QUIC превосходит UDP, снижая количество передаваемых пакетов и повышая устойчивость к потерям, что улучшает качество видео. Результаты подтверждают перспективность использования QUIC в современных сетевых системах.

Ключевые слова: QUIC, TCP, TCP+TLS, UDP, передача файлов, потоковое видео, SSIM, MSE, PSNR.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE CHARACTERISTICS OF QUIC, TCP, AND UDP PROTOCOLS IN FILE TRANSFER AND VIDEO STREAMING

YAKUPOV Denis Olegovich, PhD student
*Povolzhskiy State University of Telecommunication and Informatics
443010, Russia, Samara, d.yakupov@psuti.ru*

KARTASHEVSKIY Igor Vyacheslavovich,
Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Professor
at the Department of «Software Engineering»

Abstract. The study analyzes the performance of the transport protocols QUIC, TCP, TCP+TLS, and UDP in file transfer and video streaming. Video stream quality was evaluated using the SSIM, MSE, and PSNR metrics. QUIC demonstrates lower latency in file transfer due to rapid connection establishment, the absence of Head-of-Line blocking, and built-in reliable delivery. In video streaming, QUIC outperforms UDP by reducing the number of transmitted packets and increasing resilience to packet loss, thereby improving video quality. The results confirm the promising potential of QUIC for deployment in modern network systems.

Keywords: QUIC, TCP, TCP+TLS, UDP, file transfer, video streaming, SSIM, MSE, PSNR.

ВВЕДЕНИЕ

Транспортные протоколы TCP и UDP остаются основой сетей, но они имеют ограничения при высоких требованиях к скорости и качеству обслуживания. QUIC реализует надежную передачу данных, поверх UDP. Он снижает время установки соединения и повышает устойчивость к потерям, объединяя в себе функции шифрования. Исследование сравнивает QUIC с TCP, TCP+TLS и UDP в передаче файлов и видеопотока в локальной сети.

В настоящее время, как отмечают многие исследователи (С. П. Хабаров [1], С. В. Малахов [2, 3]), все более актуальной становится проблема выбора транспортных протоколов для передачи данных и мультимедийного контента. Современные сетевые технологии предъявляют высокие требования к скорости передачи, задержкам и качеству видеопотока. В свою очередь, производительность и надежность сетевых приложений во многом зависят от используемого протокола [1–6].

МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Эксперимент проводился в локальной сети между клиентами и сервером, которые передавали данные через маршрутизатор. Сервер и клиент использовали ПО для передачи файлов по протоколам TCP, TCP+TLS и QUIC. Для каждого

протокола выполнялась передача файлов фиксированного размера. Каждый пакет отслеживался по уникальному идентификатору, что позволяло точно измерять задержки и фиксировать повторные передачи пакетов при потерях.

Для видеопотока использовался отдельный экспериментальный стенд с разработанным ПО [7], с дополнительной сетевой нагрузкой, чтобы оценить производительность протоколов. UDP передавал данные без контроля доставки, а QUIC использовал встроенные механизмы подтверждения и повторной отправки пакетов. Качество видео оценивалось с помощью VQMT по метрикам SSIM, MSE и PSNR, включая анализ количества пакетов и влияния созданной сетевой нагрузки на канал связи.

РЕЗУЛЬТАТЫ ПЕРЕДАЧИ ФАЙЛОВ

QUIC показал меньшие задержки при передаче файлов всех размеров. Наибольшее преимущество наблюдалось при малом объеме файлов, где время установления соединения TCP и TCP+TLS составляло большую часть общего времени. QUIC сокращает это время благодаря объединенной процедуре установления соединения и шифрования. Для больших файлов разница времени передачи уменьшалась, но QUIC показал меньшее время за счет контроля перегрузками и отсутствия пауз при потерях отдельных пакетов. Анализ пакетов показал более равномерный поток данных и отсутствие повторных, что характерно для TCP.

РЕЗУЛЬТАТЫ ПОТОКОВОЙ ПЕРЕДАЧИ ВИДЕО

UDP при передаче видеопотока показал высокий уровень потерь, что приводило к фрагментации кадров и появлению артефактов получаемого изображения. QUIC минимизировал потери и сохранял структурную целостность кадров благодаря встроенной надежной доставке. Количество пакетов у QUIC было гораздо меньше, что снижало нагрузку на буферы и возникновение вероятности перегрузки. Метрики SSIM, MSE и PSNR подтвердили результаты. Качество видеопотока по протоколу QUIC было стабильнее, в то время как UDP выдавал различного рода артефакты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате эксперимента QUIC показал преимущества, в сравнении с другими рассматриваемыми транспортными протоколами. Основные

преимущества – это сокращение времени установки соединения, устойчивость к потерям и управление перегрузками. При передаче файлов QUIC уменьшает задержки в несколько раз по сравнению с TCP, а при передаче видеопотока обеспечивает более высокое качество и стабильность получаемого потока даже при сетевой нагрузке. UDP, напротив, чувствителен к потерям, что приводит к проявлению артефактов.

Список источников

1. Хабаров С. П. Анализ взаимодействия узлов по протоколу QUIC // Современные научно-технические достижения современности: новые технологии, инновационные решения : сб. науч. ст. Ульяновск, 2025. С. 34–39.
2. Якупов Д. О., Малахов С. В. Влияние протокола QUIC на скорость доставки контента до пользователя. DOI: 10.34 832/ELSV.2024.52.3.009 // Электросвязь. 2024. № 3. С. 49–53.
3. Якупов Д. О., Малахов С. В. Сравнение протоколов QUIC и SPDY в условиях высоконагруженного веб-сервера // Актуальные проблемы информатики, радиотехники и связи : материалы XXXI Рос. науч.-техн. конф. Самара, 2024. С. 53–54.
4. Якупов Д. О. Работа с потоками данных в TCP и в QUIC // VII научный форум телекоммуникации: теория и технологии ТТТ-2024 : материалы XXVI Междунар. науч.-техн. конф. Самара, 2024. С. 202–203.
5. Карташевский И. В., Якупов Д. О. HOL в HTTP/2 на TCP и HTTP/3 на QUIC // Актуальные проблемы информатики, радиотехники и связи : XXXII Рос. науч.-техн. конф. Самара, 2025. С. 82–83.
6. QUIC on the fast lane: extending performance evaluations on high-rate links / M. Kempf et al. DOI:10.1016/j.comcom.2024.04.038 // Computer communications. 2025. May. P. 90–100.
7. Программное обеспечение трансляции видео по протоколам QUIC и UDP // URL: <https://github.com/RainDarkNess/QUIC> (дата обращения: 25.11.2025).

ОБЪЕДИНЕНИЕ СЕГМЕНТОВ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ ПРИ КОНСТРУКТИВНЫХ ОГРАНИЧЕНИЯХ

ЯНИЦКАЯ Татьяна Сергеевна, кандидат технических наук,
доцент, доцент высшей школы передовых производственных технологий
Поволжский государственный университет сервиса
445017, Россия, Тольятти, yan@tolgas.ru

ГАДЖУК Никита Петрович, студент
Поволжский государственный университет сервиса
445017, Россия, Тольятти, rbmgrn@gmail.com

Аннотация. Представлен практический подход к организации проводного соединения между двумя несмежными помещениями при отсутствии прямой трассы. Для прокладки использовано подвальное пространство, что позволило создать надежный гигабитный сегмент без существенных затрат. Кратко рассмотрены примененные материалы, особенности монтажа и результаты проверки линии, включая скорость и основные параметры кабельного тракта. Даны рекомендации по дальнейшей модернизации.

Ключевые слова: локальная сеть, витая пара, кабельная инфраструктура, Gigabit Ethernet, Cat5e.

INTERCONNECTION OF TELECOMMUNICATION NETWORK SEGMENTS UNDER STRUCTURAL CONSTRAINTS

IANITSKAIA Tatiana Sergeevna, Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor, Associate Professor at the Department
of Higher School of Advanced Manufacturing Technologies
Volga Region State University of Service
445017, Russia, Togliatti, yan@tolgas.ru

GADZHUK Nikita Petrovich, student
Volga Region State University of Service
445017, Tolyatti, Russia, 445017 rbmgrn@gmail.com

Abstract. This paper presents a practical method for establishing a wired connection between two non-adjacent rooms in the absence of a direct cable route. The basement was used as an alternative pathway, enabling a reliable gigabit segment with

minimal cost. The work briefly outlines the materials, installation features, and key performance checks, including speed and cable parameters. Recommendations for potential upgrades are provided.

Keywords: local area network, twisted pair, Cable infrastructure, Gigabit Ethernet, Cat5e.

ВВЕДЕНИЕ

Объединение разнесенных рабочих зон остается актуальной задачей для офисной инфраструктуры. Несмотря на развитие беспроводных технологий, проводные линии сохраняют преимущества в стабильности и помехозащищенности. В рамках работы создан проводной канал на базе UTP Cat5e через подвальное пространство, использованное как технический коридор. Цель исследования – оценить эффективность такого решения и его эксплуатационные характеристики.

РЕЗУЛЬТАТЫ

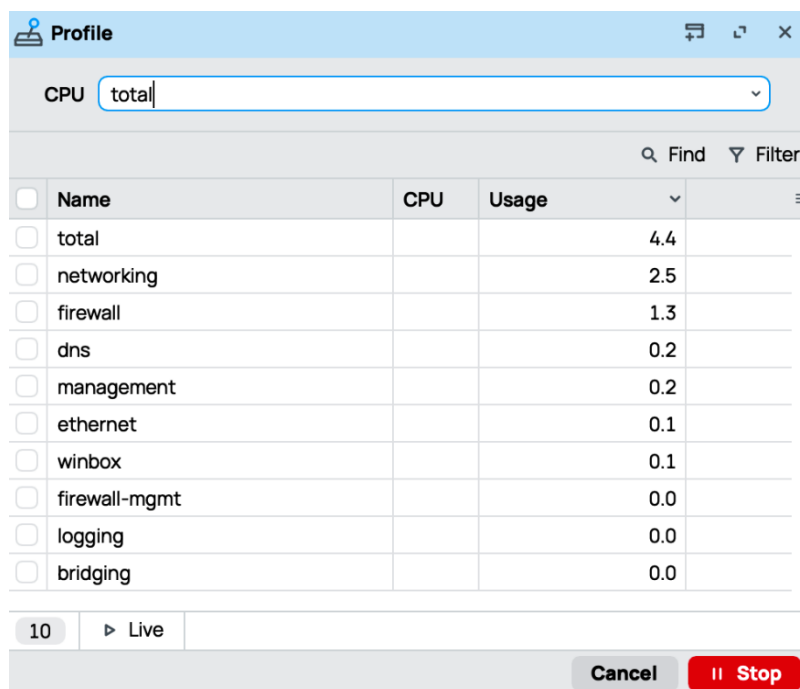
Работа включала последовательный анализ исходных условий и реализацию технического решения. На первом этапе проведена оценка нагрузки маршрутизатора Mikrotik hEX RB750Gr3, обеспечивающего обработку трафика. Низкий уровень загрузки процессора подтвердил достаточность ресурсов и исключил влияние оборудования на результаты измерений.

Мониторинг нагрузки процессора на рис. 1 показал стабильное значение около 4 %, что свидетельствует о наличии значительного запаса вычислительных ресурсов и отсутствии необходимости модернизации оборудования на данном этапе.

Исходя из текущей нагрузки на процессор (4 %) был сделан вывод, что использующийся маршрутизатор не нуждается в замене на более мощное оборудование.

Второй этап предусматривал исследование подвального пространства. Температура 20 °C и влажность 55 % соответствовали требованиям эксплуатации витой пары с ПВХ-изоляцией. Пространственная разнесенность силовых линий и кабельных каналов исключала воздействие устойчивых электромагнитных

помех при минимальном расстоянии более 150 мм. Механические параметры трассы обеспечивали допустимые радиусы изгиба и отсутствие точек напряжения.



☐	Name	CPU	Usage	
☐	total		4.4	
☐	networking		2.5	
☐	firewall		1.3	
☐	dns		0.2	
☐	management		0.2	
☐	ethernet		0.1	
☐	winbox		0.1	
☐	firewall-mgmt		0.0	
☐	logging		0.0	
☐	bridging		0.0	

Рис. 1. Показатели загрузки процессора маршрутизатора

Для оценки потерь сигнала использовались стандартные формулы затухания для витой пары [2]. Полное затухание A_{dB} рассчитывалось как сумма затухания на длину кабеля и дополнительных потерь на изгибах:

$$A_{dB} = \alpha \cdot L + \sum_{i=1}^n \Delta A_i,$$

где α – коэффициент затухания витой пары Cat5e при 100 МГц, дБ/м; L – длина кабеля в метрах; n – число изгибов; ΔA_i – дополнительное затухание на i -м изгибе в дБ. Для трассы длиной 62,74 м с семью изгибами получаем $A_{dB} \approx 11,8 + 1,4 = 13,2$ дБ, что соответствует стандарту Cat5e.

Для оценки перекрёстных наводок (NEXT) использовалась формула:

$$NEXT_{dB} = 20 \log_{10} \frac{V_{signal}}{V_{crosstalk}},$$

где V_{signal} – напряжение сигнала на передающей паре, В; $V_{crosstalk}$ – напряжение наводки на соседней паре, В. Измерения показали $NEXT_{dB} > 55$ дБ, что соответствует требованиям Gigabit Ethernet.

Пропускная способность линии C в условиях полного дуплексного соединения оценивалась как:

$$C = \frac{1}{T_{bit}} \cdot N_{pairs},$$

где T_{bit} – время передачи одного бита, с; N_{pairs} – число активных пар кабеля для передачи данных, $N_{pairs} = 4$ для 1000Base-T. Измеренные значения составили $C \approx 960$ Мбит/с с учетом протокольных накладных расходов [1].

При выборе кабеля рассматривались Cat5e, Cat6 и Cat6a. Использование категорий 6 и 6a оказалось неоправданным из-за большего диаметра, требований к изгибу и отсутствия потребности в пропускной способности выше 1 Гбит/с. Кабель UTP Cat5e обеспечивает стабильную гигабитную связь на длинах до 100 метров и соответствует стандартам ANSI/TIA-568 и ISO/IEC 11801.

Перед монтажом оценили электромагнитную обстановку в подвале: расположение силовых линий, источников помех и металлических конструкций. Расстояние до силовых трасс ≥ 150 мм и пересечения под 90° минимизируют влияние наводок. Металлические конструкции имели промышленное заземление, кабель не контактировал с токопроводящими элементами. Температура 20°C и влажность 55 % соответствуют требованиям эксплуатации ПВХ-изоляции. Все измерения выполнялись стандартным сетевым оборудованием и инструментами контроля монтажа. Характеристики трассы и кабеля. Результаты базовых параметров трассы приведены в табл. 1.

По совокупности параметров кабельная линия соответствует нормам прокладки для медных неэкранированных сегментов в офисных и технических помещениях. Нарушений радиусов изгиба, чрезмерного натяжения или перегибов по результатам визуального осмотра не выявлено.

Результаты сетевых измерений

Проверка линии проводилась в два этапа: оценка физического сегмента и измерение пропускной способности. Физические параметры (attenuation, NEXT) измерялись кабельным тестером NS-468 и встроенными средствами macOS в соответствии со стандартами TIA-568 для UTP.

Параметры прокладки и кабельной линии

Показатель	Значение
Протяженность трассы	62,74 м (измерено рулеткой по фактическому маршруту)
Количество изгибов	7 шт.
Тип кабеля	UTP Cat5e, AWG24, медь, Ø 5.0 мм
Количество линий	2 (основная + резервная)
Заполнение гофры	≈12,5 % (ниже предельных 40 %)
Минимальный радиус изгиба	50 мм, что соответствует требованиям стандарта для Cat5e
Температура в подвале	20 °С
Влажность	55 %
Расстояние до силовых трасс	Не менее 150 мм, пересечения выполнены под углом 90°

Пропускная способность локальной сети измерялась средствами macOS через команду `networkQuality` (Option клик по Wi Fi > «Сетевые параметры»), показывающую TCP скорость между узлом и маршрутизатором. Метод отражает реальную производительность канала без сторонних утилит, приближенно к обычной офисной нагрузке. Итоговые значения представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты тестирования линии

Тест	Результат
Link negotiation	1000Base-T, Full Duplex
Ping до шлюза	Среднее значение: 1 ms, jitter: 1 ms, потери: 0 %
Интернет (Яндекс Интернетометр)	Down: 79 Мбит/с, Up: 83 Мбит/с, Latency: 6 ms (19.11.2025 17:35)
networkQuality (LAN)	TCP throughput: ≈960 Мбит/с
Диагностика кабеля	Attenuation @100MHz: 22 dB, NEXT: 35 dB (в пределах нормы для Cat5e)

Анализ полученных данных

Физический канал установил гигабитный режим (1000Base-T, Full Duplex) на обоих концах. Локальный тест через `networkQuality` показал пропускную способность 940–960 Мбит/с, что типично для Gigabit Ethernet с учетом накладных расходов TCP (рис. 2).

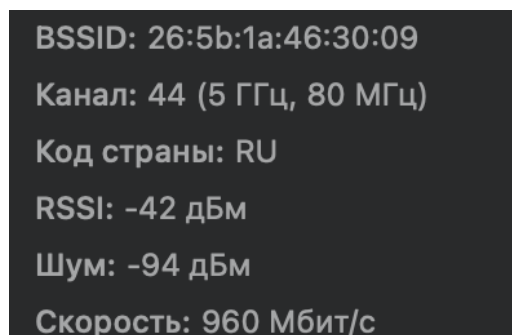


Рис. 2. Результаты измерения скорости локальной сети

Длина линии составила 62,74 м, что обеспечивает значительный запас по затуханию и NEXT (22 дБ и 35 дБ соответственно, соответствует Cat5e). Внешняя скорость составила 79/83 Мбит/с при задержке 6 мс, ограничена тарифами провайдера, а не локальной сетью (рис. 3).

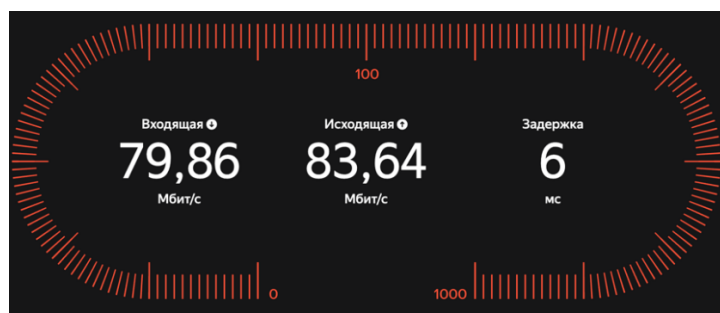


Рис. 3. Результаты измерения внешней скорости

ВЫВОДЫ

Прокладка витой пары через подвальное пространство показала себя надежным и практичным решением. Для устойчивости сети рекомендуется использовать две линии и контролировать производительность. В будущем возможен переход на Cat6/Cat6a или оптоволокно для увеличения пропускной способности и масштабируемости.

Список источников

1. Яницкий А. И. Возможности использования алгоритмов обработки сигналов в информационно-измерительных системах контроля состояния объектов // Наука – промышленности и сервису : Материалы XVIII Международной научно-практической конференции. Тольятти : ПВГУС, 2024. – С. 73–78.

2. Авксентьев А. А. Сети и системы связи : учебное пособие. 2-е изд., перераб. и доп. Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2024. 336 с. ISBN 978-5-9729-1588-0.

ОПТИМИЗАЦИЯ РАЗМЕЩЕНИЯ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЦЕНТРОВ НА ОСНОВЕ ДИСКРЕТНЫХ МОДЕЛЕЙ И ЛАГРАНЖЕВОЙ РЕЛАКСАЦИИ

ЯНИЦКАЯ Татьяна Сергеевна, кандидат технических наук, доцент,
доцент высшей школы передовых производственных технологий
Поволжский государственный университет сервиса
445017, Россия, Тольятти, yan@tolgas.ru

Аннотация. В работе рассматривается включение дискретных моделей размещения в контур стратегического планирования распределительных центров логистических операторов. Используется модель p -median как базовый механизм выбора точек размещения. Представлена модифицированная постановка с учетом буферной функции, пропускной способности и логистической нагрузки. Решение строится на лагранжевой релаксации, что снижает вычислительные затраты и сохраняет ограничения. Разработана программная архитектура метода. Архитектура содержит блок анализа спроса, блок генерации вариантов размещения и блок оптимизации. Метод применяется в системе поддержки управленческих решений.

Ключевые слова: распределительный центр, модель p -median, буферная функция, лагранжева релаксация, система поддержки принятия решений, ограничения пропускной способности, размещение объектов, оптимизация логистики.

OPTIMIZATION OF DISTRIBUTION CENTER LOCATION BASED ON DISCRETE MODELS AND LAGRANGIAN RELAXATION

IANITSKAIA Tatiana Sergeevna, Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor, Associate Professor at the Department of Higher
School of Advanced Manufacturing Technologies
Volga Region State University of Service
445017, Russia, Togliatty, yan@tolgas.ru

Abstract. The study examines the integration of discrete location models into the strategic planning loop of logistics operators' distribution centers. The p -median model is used as a core tool for selecting facility sites. A modified formulation reflects buffer

capacity, throughput limits, and load parameters. The problem is solved through Lagrangian relaxation. The method reduces computational cost and preserves valid constraints. A software architecture of the approach is presented. The architecture contains a demand analysis unit, a configuration generation unit, and an optimization unit. The method is intended for use in a decision-support module.

Keywords: distribution center, p -median model, buffer function, Lagrangian relaxation, decision support system, capacity constraints, facility location, logistics optimization.

ВВЕДЕНИЕ

Задача размещения центров является ключевой в логистических системах, поскольку выбор их местоположения влияет на затраты и устойчивость сети. Дискретные модели размещения, включая p -median, применяются для минимизации совокупных затрат при ограниченном числе центров. Классические модели часто не учитывают ограничения пропускной способности. В работе разработана модифицированная p -median модель с учетом логистической нагрузки [1].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Предложен метод решения задачи размещения центров с ограничениями пропускной способности. Задача относится к NP-трудным. Для получения допустимого решения используется восстановление примального решения из релаксированного. В лагранжевой релаксации могут нарушаться ограничения, поэтому решение корректируется. Примальное решение формируется по правилу минимального c_{ij} при соблюдении условий $d_j y_{ij} \leq C_i$. Стоимость определяется выражением $Z_{primal} = \sum_{i \in I} F_i x_i + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} c_{ij} d_j y_{ij}$. Допустимое решение задает верхнюю оценку.

Далее выполняется корректировка лагранжевых множителей. Для нарушенных ограничений по спросу используется субградиент $g_j^k = \sum_{i \in I} f_{ij}^k - D_j^k$. Обновление производится по формуле $\lambda_j^k(t+1) = \lambda_j^k(t) + \alpha_t g_j^k$. Шаг α_t зада-

ется правилом Поляка $\alpha_t = \theta(UB - Z_{dual}(t))/|g(t)|^2$. Для ограничений по центрам применяется $g_i = \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} f_{ij}^k - C_i$ и $\mu_i(t+1) = \mu_i(t) + \alpha_t g_i$. Итерации завершаются при малом двойственном зазоре, ограничении по времени или $|g(t)| < [2]$.

После завершения итераций выполняется восстановление переменных x_i и y_{ij} при фиксированных λ^* . Задача принимает вид минимизации $\min \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} (d_{ij} + \lambda_i) y_{ij}$ при ограничениях назначения и бинарности. После проверки допустимости решение корректируется при необходимости. Оценка чувствительности проводится по параметрам d_j, C_i, c_{ij} . Модель представляет собой задачу целочисленного линейного программирования, расширяющую *r-median* с учетом пропускной способности и структуры потока [3].

Ниже представлено описание переменных, используемых в формулах.

Глоссарий переменных:

c_{ij} – стоимость распределения единицы продукции от распределительного центра i к пункту потребления j ;

d_j – объем спроса (логистическая нагрузка) в пункте потребления j ;

y_{ij} – доля или бинарная переменная, указывающая, обслуживается ли пункт j центром i ($y_{ij} = 1$, если да; 0, если нет);

C_i – пропускная способность распределительного центра i , максимальный объем продукции, который может быть обработан;

F_i – фиксированные затраты на открытие распределительного центра i ;

x_i – бинарная переменная, указывающая, открыт ли распределительный центр i ($x_i = 1$, если открыт; 0, если нет);

Z_{primal} – целевая функция примальной задачи, сумма фиксированных и переменных затрат на распределение;

I – множество всех потенциальных распределительных центров;

J – множество всех пунктов потребления (или клиентов);

g_j^k – субградиент для ограничения по спросу j на итерации k , разница между суммой назначений f_{ij}^k и требуемым спросом D_j^k ;

f_{ij}^k – распределенный поток от центра i к пункту j на итерации k ;

D_j^k – требуемый объем спроса в пункте j на итерации k ;

λ_j^k – лагранжевый множитель для ограничения спроса в пункте j на итерации k ;

α_t – шаг субградиентного метода на итерации t , определяется правилом Поляка;

UB – текущая верхняя оценка (стоимость допустимого примального решения);

$Z_{dual}(t)$ – значение двойственной функции на итерации t ;

$|g(t)|$ – норма вектора субградиентов на итерации t ;

g_i – субградиент для ограничения пропускной способности центра i , раз-
ница между суммарным назначением и C_i ;

μ_i – лагранжевый множитель для ограничения по пропускной способности центра i ;

x_i, y_{ij} после завершения итераций – восстановленные переменные, соответствующие бинарным решениям при фиксированных лагранжевых множителях λ^* ;

d_{ij} – модифицированные затраты распределения, включающие лагранже-
вый множитель λ_i , в задаче восстановления;

ε – порог малости субградиента для завершения итераций.

ВЫВОДЫ

Метод позволяет учитывать реальные ограничения инфраструктуры и логистическую нагрузку. Модель расширяет классическую p -median постановку с учетом пропускной способности. Подход применим в стратегическом планировании распределительных центров и позволяет анализировать влияние параметров логистической среды.

Список источников

1. Drezner Z., Hamacher H. W. Facility Location: Applications and Theory
Berlin : Springer, 2004. 625 с. ISBN 3-540-21345-7.

2. Кохендерфер М., Рэй К., Уилер Т. Алгоритмы принятия решений. Москва : ДМК Пресс, 2023. 686 с. ISBN 978-5-93700-187-0.
3. Schonsleben P. Supply Chain Design: Business Relations and Risks // Handbook Integral Logistics Management. Springer, Berlin, Heidelberg. 2023. P. 71-126. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-662-65625-9_2.

**МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ И ДИАГНОСТИКИ ПРОМЫШЛЕННОГО
ОБЪЕКТА ДЛЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ
И УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ**

ЯНИЦКИЙ Александр Игоревич, аспирант

доцент высшей школы передовых производственных технологий

Поволжский государственный университет сервиса

445017, Россия, Тольятти, yan@tolgas.ru

РЕПНИКОВ Александр Евгеньевич, аспирант

Поволжский государственный университет сервиса

445017, Россия, Тольятти, repnikov_88@mail.ru

Аннотация. В работе рассматривается задача моделирования и диагностики отказов в промышленных системах управления. Модель учитывает структурные неопределенности и временные запаздывания, возникающие при техногенных авариях. Представлена модель динамики промышленного объекта, описывающая влияние параметрических и аддитивных возмущений на состояние системы. Предложен алгоритм дискретизации модели с сохранением идентифицируемых свойств для применения в диагностических модулях.

Ключевые слова: промышленные системы управления, техногенные аварии, модель с запаздываниями, структурные неопределенности, диагностика отказов, идентификация параметров.

**MODEL OF DYNAMICS AND DIAGNOSTICS
OF AN INDUSTRIAL OBJECT FOR INFORMATION-MEASURING
AND CONTROL SYSTEMS**

IANITCKII Aleksandr Igorevich,

PhD student, Associate Professor at the Department of Higher

School of Advanced Manufacturing Technologies

Volga Region State University of Service

445017, Russia, Togliatty, yan@tolgas.ru

REPNIKOV Aleksandr Evgenevich, PhD student

Volga Region State University of Service

445017, Russia, Togliatty, repnikov_88@mail.ru

Abstract. The study examines a model of an industrial object under structural uncertainties and time delays. The model describes the influence of parametric and additive disturbances on the system state. A discretization algorithm preserves identifiable properties for use in diagnostic modules.

Keywords: education: industrial control systems, man-made emergencies, time-delay model, structural uncertainties, fault diagnosis, parameter identification.

ВВЕДЕНИЕ

В рамках исследования была поставлена задача – разработать математическую модель динамики промышленного объекта. Цель модели – описать поведение объекта в аварийных режимах с учетом ключевых факторов: структурных неопределенностей, временных задержек и внешних возмущений.

Предполагалось, что модель будет основана на дифференциальных уравнениях с запаздыванием. Такой подход позволяет учесть временные сдвиги в каналах измерения и управления. В отдельных случаях возможен переход к дискретному времени, что улучшает точность при моделировании цифровых управляющих систем.

Структурные неопределенности должны вводиться через параметрические вариации и неопределенные динамические блоки. Такой способ описания позволит использовать методы робастного управления. Они обеспечивают устойчивость системы при неточностях модели и внешних возмущениях.

При разработке модели необходимо учитывать мультивариантную структуру управления. Это особенно важно при наличии взаимодействующих подсистем и каналов управления. Матричная форма представления позволит отразить такие взаимосвязи и упростит дальнейший синтез алгоритмов.

Ожидается, что разработанная модель станет основой для проектирования алгоритмов управления и диагностики. Это позволит перейти к построению отказоустойчивых решений, работающих в условиях высокой неопределенности.

РЕЗУЛЬТАТЫ

При аварийных режимах промышленного объекта существенно возрастают требования к точности и устойчивости модели управления. Необходимо

учитывать задержки в передаче и обработке сигналов, влияние внешних возмущений и наличие структурных неопределенностей. Эти особенности отражаются в формализованной задаче моделирования, где поведение системы описывается системой линейных дифференциальных уравнений первого порядка с постоянными запаздываниями и возможными структурными возмущениями, с запаздыванием и неопределенностями в параметрах.

Такая модель применяется при описании реальных технологических процессов, где задержки по входу и состоянию вызваны инерционностью исполнительных механизмов и распределенным характером процессов.

Динамика объекта описывается следующей системой уравнений (1):

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + A_d x(t - \tau_x) + Bu(t - \tau_u) + Dw(t), \quad y(t) = Cx(t), \quad (1)$$

где $x(t) \in R^n$ – вектор состояния системы в момент времени t ; $\dot{x}(t)$ – производная состояния по времени, т. е. скорость изменения состояния; $A \in R^{n \times n}$ – матрица состояния, описывающая внутреннюю структуру системы без запаздываний; $A_d \in R^{n \times n}$ – матрица, характеризующая влияние запаздываний по состоянию; $\tau_x > 0$ – скаляр, обозначающий запаздывание по состоянию; $B \in R^{n \times m}$ – матрица управления, определяющая влияние входа $u(t)$ на состояние $x(t)$; $\tau_u > 0$ – скаляр, обозначающий запаздывание по входу; $u(t - \tau_u) \in R^m$ – вектор управляющего воздействия с запаздыванием; $D \in R^{n \times q}$ – матрица, описывающая влияние внешних возмущений; $w(t) \in R^q$ – вектор возмущающих воздействий; $C \in R^{p \times n}$ – матрица наблюдаемости, отображающая состояние в выходной сигнал; $y(t) \in R^p$ – вектор выходных измеряемых переменных.

Первое уравнение системы моделирует изменение вектора состояния $x(t)$ под действием текущего состояния, запаздывающего состояния, запаздывающего управляющего воздействия и внешнего возмущения. Наличие слагаемого $x(t - \tau_x)$ учитывает эффект задержки реакции системы на ее предыдущее состояние, а $u(t - \tau_u)$ отражает запаздывание управляющих сигналов. Слагаемое $w(t)$ моделирует внешние ненаблюдаемые воздействия или шумы.

Второе уравнение системы задает выход системы $y(t)$ как линейную функцию от текущего состояния $x(t)$. Оно позволяет связать модель с измеримыми

величинами и используется для задач наблюдаемости и построения алгоритмов управления.

Система считается заданной при наличии:

- начального условия $x(t) = \phi(t)$ на интервале $t \in [-\tau_x, 0]$,
- функции управления $u(t)$ на $t \in [-\tau_u, +\infty)$,
- функции возмущений $w(t)$ на $t \in [0, +\infty)$.

Если параметры системы A , A_d , B , C и D известны точно, то задача управления может быть сведена к классической проблеме синтеза регулятора с запаздыванием. Однако в большинстве реальных случаев элементы матриц A , A_d , B и D подвержены неопределенности, которая может быть структурной или параметрической.

Далее будет рассмотрен подход к учету структурных неопределенностей и анализу устойчивости такой системы при помощи линейных матричных неравенств. Перед этим необходимо уточнить класс допустимых возмущений и форму неопределенностей, которые могут быть описаны в рамках робастного управления.

Таким образом, предлагается рассмотреть: методы дискретизации модели с запаздыванием; построение множества допустимых параметров с учетом неопределенностей; определение достаточных условий устойчивости; использование QPLEX-методов для численного анализа.

На следующем этапе проведем учет структурных неопределенностей и ограничений на вход. При построении моделей промышленных объектов необходимо учитывать влияние структурных неопределенностей. Эти неопределенности связаны с неточностями в параметрах модели, а также с упрощениями, возникающими при ее формализации. Введем модель объекта с учетом структурных неопределенностей следующим образом:

Обозначения: $x(t)$ – вектор состояния объекта размерности n ; $u(t)$ – вектор управляющих воздействий размерности m ; $w(t)$ – вектор внешних возмущений размерности p ; $\Delta(t)$ – оператор структурной неопределенности.

Динамика объекта с учетом неопределенности описывается уравнением (2):

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + A_d x(t - \tau_x) + Bu(t - \tau_u) + Dw(t) + E\Delta(t)Fx(t), \quad (2)$$

где $A \in R^{n \times n}$ – матрица, описывающая основную динамику объекта; ее элементы характеризуют влияние текущих состояний на скорость изменения состояния; $A_d \in R^{n \times n}$ – матрица запаздывания состояния с задержкой τ_x , моделирующая влияние прошлого состояния на динамику; $B \in R^{n \times m}$ – матрица, задающая влияние управляющих воздействий на динамику объекта с задержкой τ_u ; $D \in R^{n \times p}$ – матрица воздействия возмущений $w(t)$ на состояние объекта; $E \in R^{n \times q}$ – матрица, формирующая вход оператора неопределенности, связывает неопределенность с состоянием; $F \in R^{r \times n}$ – матрица, формирующая выход оператора неопределенности, преобразует текущее состояние к форме воздействия неопределенности; $\Delta(t) \in R^{q \times r}$ – матрица структурных неопределенностей, ограниченная по норме, моделирующая неизвестные и изменяющиеся параметры; Параметры $\tau_x \geq 0$ и $\tau_u \geq 0$ – фиксированные временные задержки состояния и управления.

Ограничение на неопределенность (3):

$$|\Delta(t)| \leq \delta, \quad (3)$$

где $\delta > 0$ – константа, определяющая максимальный уровень структурных неопределенностей.

Управляющие воздействия $u(t)$ ограничены по компонентам:

$u_{min} \leq u(t) \leq u_{max}$, $u_{min} \in R^m$ – минимальных значений управления; $u_{max} \in R^m$ – вектор максимальных значений управления; $u(t)$ – вектор управляющих воздействий размерности m ; u_{min} и u_{max} – векторы, задающие соответственно нижние и верхние ограничения на каждую компоненту $u(t)$; знак $\leq$ применяется покомпонентно: это означает, что каждое значение $u_i(t)$ должно удовлетворять $u_{min,i} \leq u_i(t) \leq u_{max,i}$; R^m – пространство всех векторов размерности m с вещественными компонентами. Данная модель является основой для последующего анализа устойчивости и синтеза управления с учетом задержек и неопределенностей. Рассмотрим далее дискретизацию модели с запаздыванием. Для построения алгоритмов оценки устойчивости и разработки управляющих воздействий необходимо привести непрерывную модель к дискретному виду.

Предположим, что дискретизация осуществляется с фиксированным шагом $h > 0$. Обозначим $x_k = x(kh)$, $u_k = u(kh)$, $y_k = y(kh)$, $w_k = w(kh)$.

Запаздывания τ_x и τ_u предполагаются кратными шагу дискретизации. Тогда (4):

$$\tau_x = d_x h, \quad \tau_u = d_u h, \quad d_x, d_u \in N. \quad (4)$$

Применим метод эквивалентной дискретизации, учитывая, что поведение системы за шаг можно аппроксимировать линейным оператором перехода. Тогда дискретная модель запишется в следующем виде (5):

$$x_{k+1} = \Phi x_k + \Phi_d x_{k-d_x} + \Gamma u_{k-d_u} + \Gamma_w w_k \quad (5)$$

$$y_k = C_d x_k,$$

где $\Phi \in R^{n \times n}$ – дискретная матрица состояния; $\Phi_d \in R^{n \times n}$ – дискретная матрица запаздывания по состоянию; $\Gamma \in R^{n \times m}$ – матрица дискретного управления; $\Gamma_w \in R^{n \times q}$ – дискретная матрица внешних воздействий; $C_d \in R^{p \times n}$ – матрица выходов в дискретном виде.

Связь между непрерывными и дискретными матрицами устанавливается как (6):

$$\Phi = e^{A_0 h}, \quad \Gamma = \int_0^h e^{A_0 s} B_0 ds, \quad \Gamma_w = \int_0^h e^{A_0 s} D ds \quad (6)$$

При наличии неопределенностей в A , B и C вводим их дискретные аналоги (7):

$$\Phi = \Phi_0 + \Delta\Phi, \quad \Gamma = \Gamma_0 + \Delta\Gamma, \quad C_d = C_0 + \Delta C_d, \quad (7)$$

где $\Delta\Phi$ – возмущение дискретной матрицы состояния; $\Delta\Gamma$ – возмущение дискретной матрицы управления; ΔC_d – возмущение матрицы выходов.

Ограничения на возмущения задаются в виде (8):

$$|\Delta\Phi| \leq \epsilon_\Phi, \quad |\Delta\Gamma| \leq \epsilon_\Gamma, \quad |\Delta C_d| \leq \epsilon_C \quad (8)$$

Модель в условиях неопределенностей и запаздываний приобретает следующий вид:

$$x_{k+1} = (\Phi_0 + \Delta\Phi)x_k + \Phi_d x_{k-d_x} + (\Gamma_0 + \Delta\Gamma)u_{k-d_u} + \Gamma_w w_k \quad (9)$$

$$y_k = (C_0 + \Delta C_d)x_k.$$

Для дальнейшего анализа потребуется сформулировать условия робастной устойчивости этой дискретной модели. Эти условия будут использоваться при построении алгоритма оценки поведения системы и генерации управляющих воздействий.

ВЫВОДЫ

Авторами рассмотрены алгоритмы комбинированной диагностики, основанные на сверточных и ансамблевых моделях. Разработана модель динамики промышленного объекта, учитывающая структурные неопределенности, запаздывания и ограничения на входные сигналы. Проведена дискретизация модели, что позволило адаптировать ее для работы с реальными данными. Полученные результаты подтвердили эффективность предложенного подхода для анализа сложных промышленных систем. Для устранения выявленных ограничений предлагается разработать алгоритмы комбинированной диагностики, объединяющие преимущества сверточных и ансамблевых моделей, что позволит повысить точность и надежность обнаружения неисправностей в условиях структурных неопределенностей.

Таким образом, разработан алгоритм дискретизации динамической модели с временными запаздываниями и ограничениями на входы, предназначенный для использования в диагностических модулях систем управления. Алгоритм обеспечивает сохранение идентифицируемых свойств модели при переходе к вычислительно реализуемой форме. Предложена архитектура комбинированного диагностического алгоритма, включающая сверточные нейронные сети и ансамблевые методы классификации.

Для дальнейшего повышения точности диагностики предлагается применить метод на основе рекуррентной сверточной нейронной сети, способный учитывать временные зависимости и устойчиво работать в условиях помех.

Список источников

1. Fridman E. Introduction to Time-Delay Systems: Analysis and Control. Basel : Birkhauser, 2014. 362 p. (Systems & Control: Foundations & Applications). DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-09393-2>.

2. Артющенко В. М., Воловач В. И. Синтез нелинейных марковских моделей на основе применения принципов вариационного исчисления // Радиолокация, навигация, связь : сб. тр. XXXI Междунар. науч.-техн. конф. : в 6 т. Т. 6. Воронеж : ВГУ, 2025. С. 146–152.

3. Воловач, В. И. Математический анализ алгоритмов оценки ошибки определения параметров движения маневрирующих объектов // Информационно-технологический вестник. 2024. № 3 (41). С. 48–55.

**QUEUEING PLEX ДЛЯ ОЦЕНКИ
УСТОЙЧИВОСТИ МНОГОСЕРВЕРНОЙ
ОЧЕРЕДИ $Mt/G/N$ С ПЕРЕМЕННЫМ СПРОСОМ**

ЯНИЦКАЯ Татьяна Сергеевна, кандидат технических наук, доцент,
доцент высшей школы передовых производственных технологий
Поволжский государственный университет сервиса
445017, Россия, Тольятти, yan@tolgas.ru

МАМЕДОВ Анар Фархад оглы, аспирант
Поволжский государственный университет сервиса
445017, Россия, Тольятти, Mamedov.anar.f@gmail.com

Аннотация. В работе представлен метод оценки устойчивости многосерверной очереди типа $Mt/G/N$ с переменным спросом, основанный на показателе Queueing PLEX (QPLEX). В модели допускается произвольное распределение времени обслуживания и нестационарный входной поток с переменной интенсивностью. Методика учитывает динамическую структуру состояний системы в дискретных моментах времени и использует вероятностные меры для оценки степени устойчивости при флуктуациях входного потока. Предложен алгоритм расчета QPLEX на основе маргинального распределения числа обслуживаемых клиентов и оставшихся времен обслуживания. Рассмотрена процедура идентификации ключевых параметров и проведен анализ устойчивости при изменении характеристик спроса. Метод предназначен для использования в задачах управления производственными, логистическими и телекоммуникационными системами, чувствительными к краткосрочным перегрузкам. Полученные результаты позволяют формализованно оценивать риски нарушения устойчивости и поддерживать заданный уровень качества обслуживания в условиях неопределенности.

Ключевые слова: многосерверная очередь, $Mt/G/N$, дискретное время, переменный спрос, флуктуации интенсивности, QPLEX, устойчивость, интервальные оценки, перегрузка, логистика.

**QUEUEING PLEX FOR STABILITY ASSESSMENT
OF THE $Mt/G/N$ MULTISERVER QUEUE
WITH TIME-VARYING DEMAND**

IANITSKAIA Tatiana Sergeevna, Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor, Associate Professor at the Department of Higher
School of Advanced Manufacturing Technologies
Volga Region State University of Service
445017, Russia, Togliatty, yan@tolgas.ru

MAMEDOV Anar Farkhad ogly, PhD student
Volga Region State University of Service
445017, Russia, Togliatty, Mamedov.anar.f@gmail.com

Abstract. A $M_t/G/N$ queue is studied. The arrival rate varies in time. Service times follow a general law. The number of servers is N . The model is built in discrete time. Load bounds are introduced. The QPLEX method is used. It gives upper and lower bounds. The queue maximum is estimated. An analytic approximation is proposed. A numerical case is presented. Demand fluctuations are analyzed. The method fits logistics systems. It works under varying load. It can be adapted to network models. The results help assess stability. Overload conditions are discussed. Capacity bounds are derived.

Keywords: multi-server queue, $M_t/G/N$, discrete time, variable demand, arrival rate fluctuations, QPLEX, stability, interval bounds, overload, logistics

ВВЕДЕНИЕ

Рассмотрена модель $M_t/G/N$. Поток заявок – нестационарный. Времена обслуживания – произвольные. Каналов обслуживания – N . Модель описана в дискретном времени. Введены интервальные оценки загрузки. Используется метод QPLEX. Он строит верхние и нижние оценки. Рассчитан максимум очереди. Дано аналитическое приближение. Приведен численный пример. Изучено влияние флуктуаций спроса. Показана применимость к логистике. Метод применим при переменной нагрузке. Возможна адаптация к сетевым моделям. Полученные результаты полезны для анализа устойчивости. Рассмотрены условия перегрузки. Дана оценка пропускной способности.

РЕЗУЛЬТАТЫ

За основу исследования в работе рассмотрели базовую модель $M_t/G/n$ классической многоканальной очереди с:

- M_t : неоднородным пуассоновским процессом прибытия (интенсивность $\alpha^{(t)}$ зависит от времени).
- G: произвольным (General) распределением времени обслуживания.
- n: параллельными серверами (каналами обслуживания).

Такая модель имеет множество сфер практического применения и ее вариации образуют основу для многих практических моделей стохастических сетей. Эта модель может быть адаптирована под разные задачи.

Предположим, что мы включаем в состояние модели текущее количество клиентов в системе. Однако одной только этой информации недостаточно для точного моделирования. Причина в том, что процесс обслуживания не является мгновенным или фиксированным по времени – наоборот, его продолжительность подчиняется произвольному (general) распределению, описываемому функцией массовой вероятности (PMF). Это значит, что клиенты могут обслуживаться разное количество времени, и просто зная, сколько их сейчас в системе, невозможно определить, сколько их останется к следующему шагу времени.

Следовательно, модель должна содержать не только число клиентов, но и некоторую информацию о состоянии каждого из них, а именно – о том, сколько времени каждому из них осталось до завершения обслуживания. Это необходимо для корректного перехода к следующему состоянию в дискретной временной цепи.

Существует два естественных способа учета этой информации:

- Отслеживать, сколько времени уже прошло с начала обслуживания каждого клиента.
- Отслеживать, сколько времени осталось до его завершения.

Для построения корректной и вычислимой марковской модели многосерверной очереди с произвольным распределением обслуживания необходимо:

- включать в описание состояния не только количество клиентов, но и информацию об оставшемся времени их обслуживания;
- использовать дискретно-временную цепь Маркова;

– формировать переходы между состояниями на основе завершения обслуживания и поступления новых клиентов в конце каждой временной эпохи.

Этот подход обеспечивает как точность моделирования динамики системы, так и возможность дальнейшего вычисления характеристик производительности, включая вероятностное распределение числа клиентов, загрузку каналов и параметры ожидания.

Это приводит к постановке задачи для стохастического процесса. Для ($l \geq 1$) пусть $Y_l^{(t)}$ обозначает количество клиентов на обслуживании с оставшейся длительностью обслуживания, равной l , в момент времени t , $a(Y_0^{(t)})$ – общее количество клиентов в системе в момент времени t . Обозначив $Y^{(t)} = (Y_0^{(t)}, Y_1^{(t)}, \dots)$, мы видим, что $\{Y^{(t)}: t \geq 0\}$ является марковской цепью. Поскольку $\sum_{l \geq 1} Y_l^{(t)}$ представляет количество клиентов на обслуживании в момент времени t , пространство состояний задается как:

$$\left\{ y: y_l \in Z_+ \text{ для всех } l \geq 0, \sum_{l \geq 1} y_l = \min(y_0, n) \right\}.$$

Мы работаем с несколько иной Марковской цепью по следующим причинам.

Во-первых, в контексте моделирования распределительных центров важно не только отслеживать текущее количество клиентов на обслуживании с различными оставшимися временами, но и учитывать буферизацию входящего потока, а также возможные ограничения по числу доступных серверов и объему буфера. Поэтому классическая модель, где $\{Y^{(t)}\}$ полностью описывает систему через распределение оставшегося времени обслуживания, требует расширения.

Во-вторых, основное внимание в данной работе сосредоточено на вычислении карт Queueing Plex (QPLEX) – многомерных распределений вероятностей состояний, которые отражают поведение системы во времени и позволяют строить точные оценки производительности. Для этого необходимо, чтобы Марковская цепь имела компактное и структурированное пространство состояний, пригодное для дискретной аппроксимации и дальнейшей реализации.

В связи с этим мы модифицируем определение состояния, включая в него не только вектор $(Y_1^{(t)}, Y_2^{(t)}, \dots)$, но также явным образом вводим ограничение на количество активных каналов обслуживания – не более n . Таким образом, для каждого момента времени t число клиентов на обслуживании с оставшейся длительностью l (где $l \geq 1$) подчиняется ограничению:

$$\sum_{l \geq 1} Y_l^{(t)} \leq n.$$

При этом буфер может содержать до b клиентов в ожидании с соответствующим ограничением на $Y_0^{(t)}$:

$$Y_0^{(t)} - \sum_{l \geq 1} Y_l^{(t)} \leq b.$$

Кроме того, мы переопределяем марковский процесс так, чтобы переходы состояний учитывали:

- поступления новых клиентов в конце интервала времени согласно процессу Mt с интенсивностью;
- обновление оставшихся времён обслуживания (сдвиг на 1 единицу времени вниз);
- завершение обслуживания клиентов с $l=1$;
- начало обслуживания новых клиентов в порядке очереди при наличии свободных серверов.

Именно эта модифицированная формулировка позволяет строго и эффективно вычислять вероятностные характеристики интересующих нас показателей системы: распределение загрузки, пропускную способность, долю обслуженных в срок и другие.

Таким образом, введенная нами марковская модель:

- остается конечномерной даже при наличии общих (G) распределений обслуживания;
- обеспечивает возможность построения QPLEX–карт состояния;
- допускает учет ограничений на структуру распределительного центра – число каналов, буферную емкость, дисциплину обслуживания.

В дальнейших разделах эта модель будет использоваться как основа для построения вычислительных схем, аппроксимации по времени и анализу устойчивости системы при вариациях параметров обслуживания и поступления.

Проведем более подробную и формализованную постановку задачи:

Положим $Z^{(t)} = Y_0^{(t)}$ и $H^{(t)}(l) = Y_l^{(t)}$ для $(l \geq 1)$. Использование $(Z^{(t)}, H^{(t)})$ вместо $Y^{(t)}$ является лишь вопросом обозначений. Состояние марковской цепи $\{(Z^{(t)}, H^{(t)}): t \geq 0\}$ представляется парой (z, h) . Первая компонента z – это количество клиентов в системе.

Мы называем z счетчиком. Для $l \geq 1$ величина $h(l)$ обозначает количество клиентов на обслуживании с оставшейся длительностью обслуживания, равной l . Набор $h(l)_{l \geq 1}$ можно рассматривать либо как вектор, либо как функцию на множестве $\{1, 2, \dots\}$. Мы обозначаем его через h и называем гистограммой оставшихся длительностей обслуживания. Это вторая компонента состояния.

Ниже представлены расчеты. Предположим, что десять клиентов находятся на обслуживании, из них у четырех-пяти и одного оставшиеся длительности обслуживания равны 1, 2 и 3 соответственно. Соответствующая гистограмма оставшихся длительностей h – это гистограмма на множестве $\{1, 2, 3\}$, которую можно представить вектором $h = (4, 5, 1)$.

Пространство состояний марковской цепи $\{(Z^{(t)}, H^{(t)}): t \geq 0\}$ задается выражением (1): $\{(z, h): z \geq 0, |h| = \min(z, n)\}$, где $|h|$ – общее количество клиентов на обслуживании (сумма значений гистограммы).

n – максимальное число клиентов, которые могут одновременно обслуживаться.

Авторами была разработана модификация марковской модели многосерверной очереди для оценки вероятностного распределения количества клиентов в системе, учитывающая следующие аспекты:

– Расширение описания состояния системы, которое теперь включает как количество клиентов в системе, так и информацию об оставшемся времени их обслуживания.

– Использование дискретной временной цепи Маркова, где переходы между состояниями осуществляются на основе завершения обслуживания клиентов и поступления новых заявок, что позволяет учесть динамику изменения числа клиентов в системе.

– Модификация состояния системы с учетом ограничений: вводятся ограничения на количество активных серверов (не более n) и ограничение на емкость буфера (не более b клиентов в ожидании).

– Моделирование переходов состояний с учетом поступления новых клиентов в конце интервала времени; обновления времени обслуживания клиентов (сдвиг времени на 1 единицу); завершения обслуживания клиентов с оставшейся длительностью обслуживания 1; начала обслуживания новых клиентов в порядке очереди при наличии свободных серверов.

– Компактность и структурированность пространства состояний, что делает возможным построение многомерных распределений вероятностей состояний системы (QPLEX-карт), что служит основой для точных оценок производительности, таких как распределение загрузки, пропускная способность и другие характеристики системы.

– Пространство состояний марковской цепи задано парой (z, h) , где z – количество клиентов в системе (счетчик), а $h(l)$ – количество клиентов на обслуживании с оставшейся длительностью обслуживания, равной l . Это позволяет детально моделировать процесс обслуживания с учетом оставшихся времен, а также получить структурированные данные для анализа.

– Учет ограничений распределительного центра: модель допускает ограничение на количество обслуживаемых клиентов (не более n) и на емкость буфера (не более b).

Таким образом, разработанная марковская модель представляет собой гибкую и эффективную основу для анализа многосерверных очередей с возможностью учета разных режимов обслуживания, ограничений на ресурсы и обеспечивающую точные вычисления характеристик системы, что необходимо для дальнейшего анализа и разработки оптимизационных алгоритмов для управления распределительными центрами.

ВЫВОДЫ

Таким образом, разработана и обоснована модифицированная дискретно-временная марковская модель многосерверной очереди $M_t/G/n$ с учетом буферных ограничений, позволяющая вычислять вероятностные характеристики состояния системы (QPLEX) с включением информации об оставшемся времени обслуживания клиентов и ограничениях на число активных серверов и емкость буфера.

Список источников

1. Dieker A. B., Hackman S. T. QPLEX: A Computational Modeling and Analysis Methodology for Stochastic Systems. Cham: Springer, 2025. 357 p. ISBN 978-3-031-74869-1.
2. Гиссин В. И., Тимонин А. А., Погребная А. А. Управление транспортно-логистическими процессами: совершенствование качества и безопасности : монография. Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2021. 124 с. – ISBN 978-5-9729-0562-1.
3. Кохендерфер М., Рэй К., Уилер Т. Алгоритмы принятия решений. Москва : ДМК Пресс, 2023. 686 с. ISBN 978-5-93700-187-0.
4. Модели и методы системного анализа в исследовании операций : учебник / И. Н. Булгакова [и др.]. Москва : ИНФРА-М, 2025. 347 с. ISBN 978-5-16-111627-2. URL: <https://znanium.ru/read?id=451511> (дата обращения: 27.04.2025). Режим доступа: по подписке.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ИНТЕРОПЕРАБЕЛЬНОСТИ ИОТ-УСТРОЙСТВ В СИСТЕМАХ УМНОГО ДОМА НА БАЗЕ HOME ASSISTANT

ЯНИЦКАЯ Татьяна Сергеевна, кандидат технических наук, доцент,
доцент высшей школы передовых производственных технологий
Поволжский государственный университет сервиса
445017, Россия, Тольятти, *yan@tolgas.ru*

ХОХЛОВ Евгений Алексеевич, студент
Поволжский государственный университет сервиса
445019, Россия, Тольятти, *eragon454545@gmail.com*

Аннотация. Представлено экспериментальное исследование интероперабельности IoT-устройств в системе умного дома на базе Home Assistant. Проанализировано поведение устройств разных производителей при работе через Zigbee, IPR и локальные сетевые протоколы. Выполнена оценка автоматического обнаружения оборудования, корректности выполнения автоматизаций, задержек отклика, согласованности данных и рисков эксплуатации. Построены модели I, F, S, A, L_{avg} , L_{95} , C, R и TCO для формализации свойств системы. Исследование подтверждает возможность создания локальной открытой архитектуры управления без использования облачных сервисов и позволяет количественно оценивать интеграционные свойства конфигураций умного дома.

Ключевые слова: интероперабельность IoT, Home Assistant, Zigbee, IPR, локальная автоматизация, задержка отклика, согласованность данных, риск уязвимостей, open source.

EXPERIMENTAL ASSESSMENT OF IOT DEVICE INTEROPERABILITY IN HOME ASSISTANT-BASED SMART HOME SYSTEMS

IANITSKAIA Tatiana Sergeevna, Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor, Associate Professor at the Department of Higher
School of Advanced Manufacturing Technologies
Volga Region State University of Service
445017, Russia, Togliatty, *yan@tolgas.ru*

Abstract. The paper presents an experimental study of IoT device interoperability in a smart home system based on Home Assistant. The behavior of devices from different manufacturers is analyzed when operating through Zigbee, IPP, and local network protocols. The study includes an evaluation of automatic device discovery, correctness of automation execution, response latency, data consistency, and exploitation risk. Mathematical models I , F , S , A , L_{avg} , L_{95} , C , R , and TCO are introduced to formalize the system properties. The results confirm the feasibility of building a local open architecture without cloud services and enable quantitative assessment of integration properties in smart home configurations.

Keywords. IoT interoperability, Home Assistant, Zigbee, IPP, local automation, response latency, data consistency, vulnerability risk, open source.

ВВЕДЕНИЕ

Экспериментальная оценка интероперабельности IoT-устройств в системах умного дома на базе Home Assistant проводится с целью анализа свойств открытой архитектуры и проверки совместимости оборудования разных производителей. Исследование опирается на развертывание Home Assistant на Raspberry Pi 4 с использованием Zigbee-модуля и Ethernet. Система рассматривается как локальная платформа управления, которая поддерживает интеграции через API, IPP, Zigbee и прямые сетевые протоколы. Модель интероперабельности описывается индексом $I = \alpha \cdot \frac{n_{int}}{N} + \beta \cdot \frac{\sum_{p=1}^P w_p \cdot 1p \text{ supported}}{\sum_{p=1}^P w_p} + \gamma \cdot \frac{\sum_{k=1}^K m_k \cdot 1k \text{ supported}}{\sum_{k=1}^K m_k}$, который показывает долю поддерживаемых устройств, протоколов и механизмов взаимодействия.

РЕШЕНИЕ

Тестовая система включала лампочку Xiaomi smart led bulb, розетку Aqara, одноканальный SMART выключатель и принтер Canon Maxify MB2140. Home Assistant автоматически определил часть устройств через Zigbee-координатор,

что подтвердило корректность связи [1–3]. Остальные устройства были добавлены вручную через интерфейс интеграций. Реакции между SMART выключателем и лампочкой работали через редактор автоматизаций. Розетка Aqara управляла нагрузкой. Принтер Canon был подключен через IPP и выполнил печать тестовых документов (рис. 1).

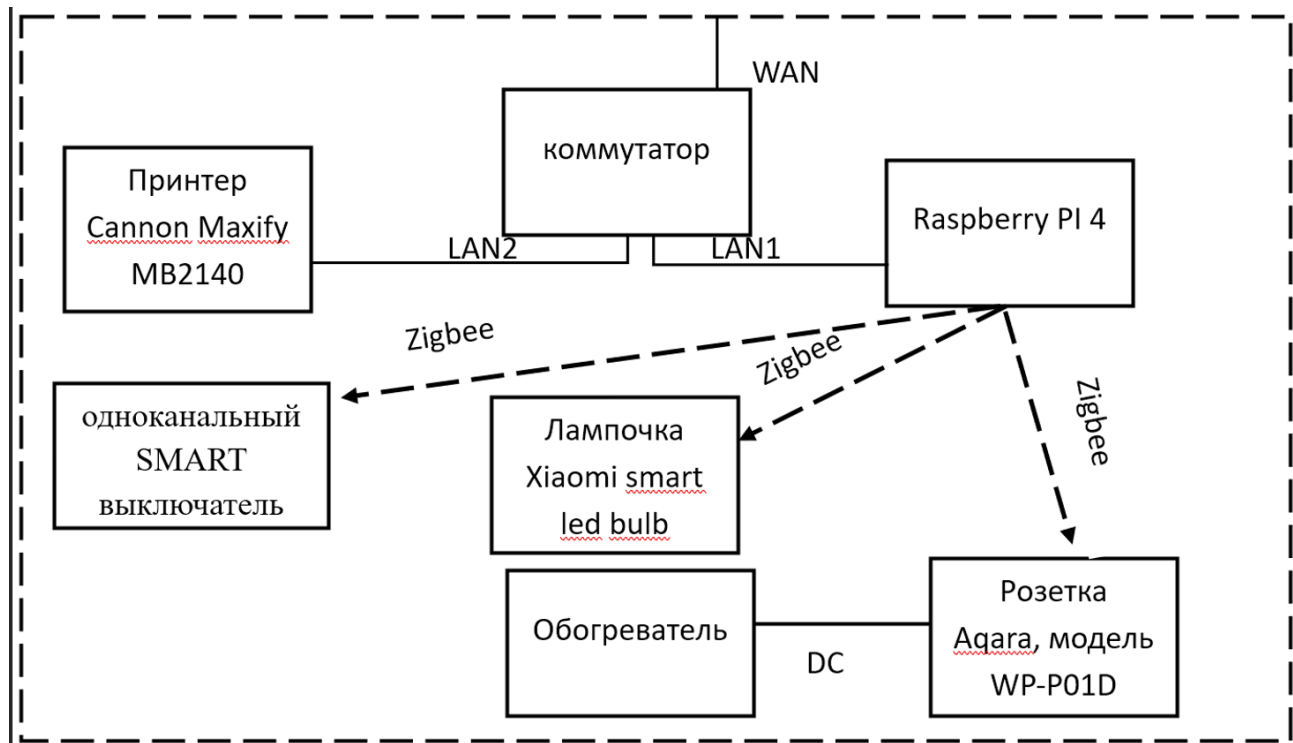


Рис. 1. Принципиальная схема сети

Функциональная полнота интеграции задана выражением $F = \frac{1}{n_{\text{int}}} \sum_{i=1}^{n_{\text{int}}} \frac{\sum_{j=1}^{J_i} a_{ij}}{J_i}$ и характеризует полноту поддерживаемых действий для каждого устройства. Проверка стабильности автоматизаций показала работоспособность сценариев при обычной нагрузке. Надежность взаимодействий определяется значением $S = \frac{N_{\text{ok}}}{N_{\text{ok}} + N_{\text{fail}}}$ и отражает корректность выполнения команд без ошибок.

Доступность локальной платформы выражена как $A = \frac{\text{MTBF}}{\text{MTBF} + \text{MTTR}}$.

Задержки команд измерялись при выполнении M последовательных операций. Средняя задержка описывается формулой $L_{\text{avg}} = \frac{1}{M} \sum_{t=1}^M l_t$. Квантиль задержки оценен как $L_{95} = \inf \left\{ x: \frac{1}{M} \sum_{t=1}^M 1_{l_t \leq x} \geq 0.95 \right\}$. Согласованность данных

между состояниями устройств и состояниями, отраженными в интерфейсе, вычисляется по модели $C = 1 - \frac{1}{Q} \sum q = 1^Q \frac{|x_q - y_q|}{\max(\epsilon, |x_q| + |y_q|)}$.

Безопасность локальной архитектуры анализируется через модель риска $R = 1 - \prod_{v=1}^V (1 - p_v \cdot e_v \cdot c_v)$, где p_v – вероятность уязвимости, e_v – вероятность эксплуатации, c_v – коэффициент критичности. Оценка стоимости владения определяется выражением $ТСО = \frac{C_{сарех} + C_{орех}}{n_{int} \cdot \bar{J}}$ и отражает затраты на оборудование и эксплуатацию.

Интегральная характеристика качества конфигурации вычисляется по формуле $B = \lambda_1 I + \lambda_2 F + \lambda_3 S + \lambda_4 A - \lambda_5 L_{95} + \lambda_6 C - \lambda_7 R - \lambda_8 ТСО$. Модель показывает вклад интероперабельности, функциональной полноты, надежности, доступности, согласованности, рисков и затрат.

ВЫВОДЫ

Полученные результаты подтверждают способность Home Assistant объединять оборудование разных производителей и поддерживать автоматизации на локальном уровне. Платформа демонстрирует гибкие возможности интеграции через открытые интерфейсы и позволяет исследовать интероперабельность без использования облачных сервисов. Работа показывает, что открытые IoT-системы могут служить основой для анализа протоколов, оценки взаимодействий и разработки расширяемых конфигураций умного дома с контролируемыми латентностями, рисками и функциональными возможностями.

Список источников

1. ESP32-C3. Беспроводное приключение. Полное руководство по IoT : практ. рук. / пер. с англ. Ю. В. Ревича. Москва : ДМК Пресс, 2023. 443 с. ISBN 978-5-93700-248-8.
2. Корецкий Р. Raspberry Pi OS: Системное администрирование с systemd и Python : практ. рук. / пер. с англ. Ю. В. Ревича. Москва : ДМК Пресс, 2024. 316 с. ISBN 978-5-93700-284-6.
3. Цифровая трансформация: IoT, AI, VR, Big Data / Digital Transformation: IoT, AI, VR, Big Data : сб. докладов XII междунар. студен. науч.-практ. конф. /

отв. за вып. М. А. Иванова. Москва : Дело (РАНХиГС), 2019. 256 с. ISBN 978-5-85006-171-5. URL: <https://znanium.com/catalog/product/1405779> (дата обращения: 03.10.2025). Режим доступа: по подписке.