

На правах рукописи



Аль-Мусави Висам Мохаммедтаки М Джавад

**Адаптивный алгоритм обработки пространственно-временных сигналов в  
MIMO-системе радиосвязи для базовой и мобильной станций**

2.2.13. Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Таганрог – 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Южный федеральный университет» на кафедре теоретических основ радиотехники Института радиотехнических систем и управления.

Научный **Федосов Валентин Петрович**  
руководитель: доктор технических наук, профессор

Официальные **Разиньков Сергей Николаевич**  
оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования «Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), профессор кафедры электрооборудования (и оптико-электронных систем)

**Грачев Максим Викторович**  
кандидат технических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В. Ф. Уткина» (г. Рязань), доцент кафедры радиотехнических устройств

Защита состоится «18» декабря 2025 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета ЮФУ801.02.07 Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южный федеральный университет» по адресу: Ростовская обл., г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, корпус «Г», ауд. Г-117.

С диссертацией можно ознакомиться в Зональной научной библиотеке им. Ю.А. Жданова Южного федерального университета по адресу: г. Ростов-на-Дону, ул. Зорге, 21 Ж и на сайте: <https://hub.sfedu.ru/diss/show/1346870/>

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 г.

Отзыв на автореферат (с указанием ФИО (полностью), ученой степени со специализацией, ученого звания, организации, подразделения, должности, адреса, телефона, e-mail, даты) с заверенной подписью рецензента и печатью учреждения просим направлять в 2 экз. ученому секретарю диссертационного совета ЮФУ801.02.07 по адресу: 347922, Ростовская обл., г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, корпус «Д», а также в формате pdf – на e-mail: [ampilipenko@sfedu.ru](mailto:ampilipenko@sfedu.ru).

Ученый секретарь  
диссертационного совета ЮФУ801.02.07  
кандидат технических наук, доцент



А. М. Пилипенко

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Стремительное развитие технологий беспроводной связи кардинально изменило способ передачи и получения информации в современных сетях. Поскольку мобильные приложения требуют все более высоких скоростей передачи данных, меньшей задержки и повышенной надежности, ограничения традиционных систем связи стали более очевидными. Решение этих проблем требует инновационных стратегий, которые используют пространственные и временные измерения беспроводных каналов<sup>1</sup>.

В диссертации исследуется адаптивный алгоритм обработки сигнала, разработанный для пространственно-временной передачи данных в беспроводных системах MIMO-OFDM. Ключевым новшеством этой работы, является одновременное развертывание адаптивного алгоритма как на базовой станции, так и на мобильной станции, что позволяет оптимизировать пути сигнала в реальном времени. Динамически направляя характеристики антенных решеток в направлении наиболее благоприятных путей распространения сигналов и подавляя помехи, алгоритм значительно повышает качество сигнала и пропускную способность системы<sup>2</sup>.

Исследование основывается на сильных сторонах MIMO и OFDM, двух основополагающих технологий в современных беспроводных стандартах, таких как WiMAX<sup>3</sup>. Модифицирована подробная трехмерная модель канала, отражающая сложность городской многопутной среды, включающая такие элементы, как отражение сигнала, дифракция и доплеровский сдвиг<sup>4</sup>, а также учитывающая изменение характеристик направленности антенны мобильной станции в результате ее адаптации. Эта модель поддерживает комплексное моделирование, которое оценивает влияние адаптивной обработки на производительность системы при различных схемах модуляции и условиях разных SNR<sup>5</sup>.

С помощью теоретического моделирования и анализа на основе симуляции диссертация демонстрирует, как адаптивная пространственно-временная обработка – при использовании на обоих концах линии связи – может значительно снизить частоту ошибок битов, повысить спектральную эффективность и

---

<sup>1</sup>Dougherty, G. Digital image processing for medical applications / G. Dougherty. – Cambridge: Cambridge University Press, 2009. – 459 p.

<sup>2</sup>Eklund, C. IEEE standard 802.16: a technical overview of the WirelessMAN/sup TM/air interface for broadband wireless access/ C. Eklund, R.B. Marks, K.L. Stanwood, S. Wang // IEEE communications magazine. – 2002. – 40, (6). – P. 98-107.

<sup>3</sup>Jadav, N.K. Improving BER of WiMAX using interference mitigation techniques/ N.K. Jadav // Book Improving BER of WiMAX using interference mitigation techniques. – 2019. – P. 1-7.

<sup>4</sup>Kleynhans, W. On channel estimation for mobile WiMAX / W. Kleynhans. – Pretoria: University of Pretoria. – 2009. – 435 p.

<sup>5</sup>Li, B. Further results on high-rate MIMO-OFDM underwater acoustic communications / B. Li, J. Huang, S. Zhou, K. Ball, M. Stojanovic, L. Freitag, P. Willett // Book Further results on high-rate MIMO-OFDM underwater acoustic communications. IEEE. – 2008. – P. 1-6.

поддерживать надежную передачу данных даже в сценариях отсутствия прямой видимости (NLoS). Предлагаемая структура предлагает масштабируемое и эффективное решение для будущих беспроводных систем, которые должны надежно работать во все более плотных и динамичных коммуникационных средах<sup>6</sup>.

В представляемом научном исследовании необходимо разработать и исследовать на основе моделирования систему связи в воздушном канале для городской среды при плотной застройке в условиях многочисленных переотражений на основе принципа «информированный приемник и информированный передатчик» на основе уже разработанного принципа обработки пространственно-временных сигналов. Требуется разработать алгоритм для обработки сигналов, а также реализовать его в среде MATLAB.

Возможность автономного управления мобильными пользователями, обмена информацией, голосовой и видеосвязи без использования кабельных соединений является особенностью беспроводных систем связи. Из-за эффекта затухания сигнала, который меняется в зависимости от расстояния и частоты, эффекта Доплера, скорости подвижности абонентского терминала и многопутного распространения, связанного с рефракцией и отражением волн, полоса пропускания беспроводного канала в таких системах ограничена. Применение антенных решеток в радиосигналах основано на способности разделять сигналы в пространстве, создавая специфические характеристики направленности. Эта методика реализуется посредством адаптивной обработки сигналов, получаемых с выходов каждого элемента антенной решетки как на приемнике, так и на передатчике, что позволяет определить направление прихода сигнала от передатчика. Однако, поскольку приемник окружен множеством различных отражателей, вызывающих рассеяние сигнала, направление на источник сигнала, как правило, заранее неизвестно. Для оценки весового вектора используются различные методы<sup>7</sup>. Линейная антенная решетка является простым случаем решения задачи пространственной фильтрации. Плоская антенная решетка может быть использована для двумерной пространственной фильтрации, однако такой подход трудно реализуем из-за сложности вычислительных алгоритмов и большого числа регулируемых параметров, однако, она не учитывает отклонение направлений прихода сигналов и помех в угломестной плоскости. В связи с этим фактором возникает необходимость применять 3D-модель канала передачи информации в беспроводной среде.

В результате разработка пространственной адаптивной обработки сигналов

---

<sup>6</sup>Li, Y.G. MIMO-OFDM for wireless communications: Signal detection with enhanced channel estimation/ Y.G. Li, J.H. Winters, N.R. Sollenberger. // IEEE Transactions on communications. – 2002. – 50, (9). – P. 1471-1477.

<sup>7</sup>Легин, А. А. Адаптивный алгоритм обработки пространственно-временных сигналов для цифровой линии связи в среде с переотражениями : специальность 05.12.04 "Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Легин Андрей Алексеевич, 2019. – 167 с.

остаётся важной для беспроводных систем, осуществляющих свою деятельность в среде с затрудненным распространением сигналов.

**Целью диссертации** является повышение эффективности ММО-системы радиосвязи с помощью адаптивного алгоритма обработки пространственно-временных сигналов. Алгоритм предназначен для одновременной работы как на базовой станции, так и на мобильной станции.

Для достижения этой цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Провести поиск аналогов в международных и российских системах научно-технической информации.

2. Разработать алгоритм обработки сигналов, обеспечивающий снижение вероятности битовой ошибки и повышение пропускной способности как мобильной, так и базовой станций.

3. Модернизировать 3D-модель канала к новым параметрам и характеристикам, и использовать ее для оценки эффективности функционирования разработанного алгоритма, реализовав моделирование в программном обеспечении MATLAB.

4. Оценить производительность существующих и новых алгоритмов, определяя их способность минимизировать битовую ошибку и максимизировать пропускную способность радиосвязи при различных настройках модуляции, сигналов, антенных систем и уровне отношения сигнал/шум.

5. Проверить совместимость кодов Хэмминга и Рида-Соломона с алгоритмом обработки пространственно-временных сигналов в ММО- и SIMO-системах радиосвязи.

**Методология и методы исследования.** Методология исследований основана на применении теории многомерных случайных процессов, теории матриц и разложении пространственной корреляционной матрицы выходных сигналов и помех для антенных решеток на собственные числа и собственные вектора. Для этого надо освоить физическую интерпретацию параметров и использование их при разработке и исследовании алгоритмов обработки пространственно-временных сигналов для приемников и передатчиков базовой и мобильной станций системы передачи информации.

**Научная новизна работы:**

1. Модернизирован адаптивный алгоритм пространственно-временной обработки сигналов на выходах антенных решеток одновременно как для мобильной, так и базовой станций системы связи на основе критерия максимума отношения сигнал/шум при использовании OFDM-ММО-принципов модуляции для городских условий использования системы при многочисленных переотражениях сигналов в канале связи.

2. Исследована сравнительная эффективность алгоритмов на основе определения вероятности битовой ошибки и пропускной способности системы связи с адаптацией и без нее в зависимости от отношения сигнал/шум при изменении числа элементов антенных решеток, скорости движения мобильной станции, различных систем кодирования сигналов, дальности радиосвязи, интервалов между элементами антенных решеток как на передачу, так и на прием сигналов.

3. Исследованы вопросы интеграции адаптивной обработки с помехоустойчивыми кодами, в частности, кодами Хэмминга и Рида-Соломона, что обеспечивает дополнительное повышение устойчивости к ошибкам при передаче данных.

#### **Практическая значимость результатов:**

Улучшение качества радиосвязи в условиях городской застройки, где многочисленные отражения сигнала создают многопутность канала, достигается за счет снижения вероятности ошибок при передаче данных и увеличения максимальной скорости передачи информации. Созданный в рамках проведения настоящей работы алгоритм предоставляет возможность добиться сокращения вероятности появления ошибки BER более чем на пятнадцать процентов. Ещё одним преимуществом предложенного алгоритма является то, что благодаря его практическому внедрению растёт пропускная способность канала связи, что в особенности актуально в условиях городов, где плотная застройка создаёт препятствия для проникновения сигнала. Полученные в результате проведения исследования результаты были подтверждены по итогам моделирования, которое состоялось с использованием программно-прикладного пакета MATLAB, а также с использованием кодирования.

#### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Разработанный алгоритм повысил помехоустойчивость системы связи ММО-OFDM-систем, что отразилось на снижении вероятности битовых ошибок и повышении пропускной способности.

2. Интеграция кодов Рида-Соломона с пространственно-временным кодированием обеспечила повышение помехоустойчивости более, чем в 600 раз при  $SNR = 8$  дБ.

3. Повышение эффективности приема в SIMO-системах за счет пространственного разнесения и адаптивной обработки сигналов в мобильной станции выражается в снижении вероятности битовой ошибки (BER) на 30–50% для модуляций сигнала BPSK, QPSK, 16-QAM.

#### **Внедрение результатов:**

1. На кафедре теоретических основ радиотехники Южного федерального университета исследования, проведенные в рамках диссертационной работы, нашли практическое применение в научных исследованиях и образовательном процессе. Они стали неотъемлемой частью учебных программ таких дисциплин, как «Системы, сети и устройства телекоммуникаций», «Электроника, радиотехника и системы связи», «Статистическая радиотехника», «Обработка пространственно-временных сигналов», «Современные алгоритмы обработки пространственно-временных сигналов в сетях связи следующего поколения» «Сети фиксированной и мобильной связи», «Мультисервисные сети связи и системы коммутации».

2. Исследования, проведенные в рамках диссертационной работы, были поддержаны грантом Российского научного фонда № 22-29-01389 от 21 декабря 2021 года «Разработка алгоритмов восстановления потерянных участков

изображения карты подстилающей поверхности для беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в условиях городской инфраструктуры».

**Апробация результатов.** Результаты, представленные в диссертации, обсуждались и получили одобрение на трех международных и одной всероссийской научной конференции:

1. III Международная научно-практическая конференция «Научная инициатива иностранных студентов и аспирантов». Томский политехнический университет. Томск, 25–27 апреля 2023 г.

2. V Международная научно-практическая конференция «Научная инициатива иностранных студентов и аспирантов». Томский политехнический университет. Томск, 22–24 апреля 2025 г.

3. International scientific conference «Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves» (RSEMW). Divnomorskoe, Russia, 26–30 июня 2023 г.

4. Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием имени профессора О. Н. Пьявченко «Компьютерные и информационные технологии в науке, инженерии и управлении» (КомТех-2023). Южный федеральный университет. Таганрог, 07–09 июня 2023 г.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 9 работ, в том числе 4 статьи в научных изданиях, входящих в Перечень ВАК, 4 публикации в сборниках трудов конференций и 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

**Личный вклад.** Автор самостоятельно провел все ключевые исследования, представленные в диссертационной работе. Подходы к решению поставленных задач, методы исследования и полученные результаты были обсуждены и доработаны совместно с научным руководителем Федосовым В.П.

**Структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка литературы и приложений. Диссертация изложена на 168 страницах, содержит 32 рисунка и 8 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** диссертационного исследования была обоснована актуальность выбранной темы, сформулированы цель и задачи научного исследования, а также определены пути их достижения. Кроме того, раскрыта практическая значимость полученных результатов, изложены основные положения, выносимые на защиту, и представлена информация о внедрении разработок в реальную практику.

**В первом разделе** исследована система беспроводной связи на базе технологии WiMAX. Обладая способностью поддерживать как топологию "точка-точка", так и "точка-многоточка", а также обеспечивать безопасные высокоскоростные соединения, технология WiMAX играет ключевую роль в реализации современных решений, включая умные города, мобильный широкополосный доступ и системы дистанционного мониторинга. По мере эволюции беспроводных технологий их интеграция в различные сферы жизни продолжает углубляться, что подчеркивает критическую важность безопасных, масштабируемых и инновационных систем связи в цифровую эпоху. На основе анализа существующих научных работ по теме исследования были определены

цель диссертации и конкретные задачи, направленные на её достижение, что подчеркивает научную новизну и практическую направленность работы.

**Во втором разделе** представлены используемые модели каналов, структуры сигналов и помех. Подробно охарактеризованы ключевые особенности беспроводного канала, включая потери при распространении, отсутствие прямой видимости между передатчиком и приемником, эффекты отражения, дифракции и рассеяния радиоволн, а также замирания сигналов. На основе проведенного анализа разработана трехмерная модель распространения сигналов в беспроводной среде, учитывающая отражения от различных препятствий в пространстве. На рисунке 1 представлена геометрическая модель канала в двух проекциях. Особенностью модели является учет доплеровского сдвига частоты при движении мобильной станции с постоянной скоростью. Для рассматриваемого 3D-канала WiMAX импульсная характеристика будет иметь вид

$$h(t, \tau) = h^{LOS}(t, \tau) + h^{RB}(t, \tau) + h^{RG}(t, \tau), \tag{1}$$

где  $h^{LOS}(t, \tau)$  – компонент, описывающий прямой путь;  $h^{RB}(t, \tau)$  – компонент, описывающий отражение от здания;  $h^{RG}(t, \tau)$  – компонент, описывающий отражение от поверхности земли с учётом переотражений,  $\tau$  – задержка распространения сигнала для n-го пути.

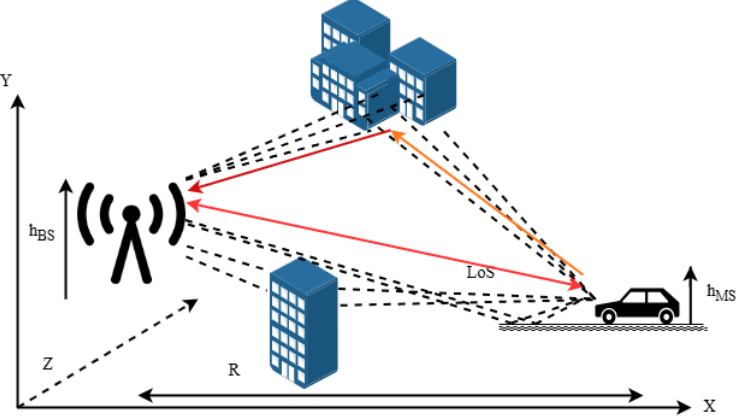


Рисунок 1 – Канал распространения сигнала для 3D-модели

То, как относительно друг друга расположены на местности мобильное устройство и базовая станция, оказывает влияние на удаление между ними. В дальнейшем для обозначения удаления мобильного устройства и базовой станции друг от друга будет использовано обозначение R. Составляя рисунок 1, было принято во внимание то, как именно воздействует высота на линию связи. Что же касается значений угловых параметров, которые также вычислялись при составлении рисунка 1, то для того, чтобы их найти, мы учитывали высоту и расстояние. Приёмное устройство не имеет стабильного положения относительно передающего устройства: с течением времени оно может меняться. И для того, чтобы охарактеризовать, как именно это происходит, нужно пользоваться вектором скорости. Направление, куда уходит сгенерированный сигнал, а также

угол его распространения относятся к категории величин случайного характера. У любого сигнала имеется несколько возможных подпутей распространения, которые не являются тем же самым, что и основной путь его распространения, отклоняясь от такового на определённую величину. Измененное уравнение для обратного сигнала с использованием пути прямой видимости имеет вид:

$$P_{LOS}^{обп} = K \left| \sum_{s=1}^S \sum_{u=1}^U e^{j\frac{2\pi}{\lambda}(d_s \sin\theta_{AOD} + h_s \cos\theta_{AOD})} \times e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}(d_u \sin\theta_{AOA} + h_u \cos\theta_{AOA})} \right| G_t G_r L_p, \quad (2)$$

где  $P_{LOS}^{обп}$  – мощность обратного сигнала LOS;  $k$  – коэффициент Райса;  $G_t, G_r$  – коэффициенты усиления антенн передатчика и приемника;  $L_p$  – потери на трассе распространения;  $d_s, h_s, d_u, h_u$  – расстояния между фазовыми центрами антенных элементов (горизонтальное и вертикальное);  $\theta_s, \theta_r$  – углы излучения и приема сигнала;  $\lambda$  – длина волны передаваемого сигнала;  $\theta_{AOD}, \theta_{AOA}$  – обновленные углы излучения и приема, соответственно, выбранные адаптивным алгоритмом для оптимального выравнивания LOS;  $S, U$  – количество антенных элементов на передатчике и приемнике соответственно.

Для прочих путей –

$$P_{NLOS}^{обп} = K_n \left| \sum_{s=1}^S \sum_{u=1}^U \alpha_n e^{j(\omega_n t + \phi_n)} e^{j\frac{2\pi}{\lambda}(d_s \sin\theta_{AOD} + h_s \cos\theta_{AOD})} \times e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}(d_u \sin\theta_{AOA} + h_u \cos\theta_{AOA})} \right| G_t G_r L_p, \quad (3)$$

где  $k$  – коэффициент отражения для  $n$ -й компонента NLOS;  $\alpha_n$  – амплитуда отраженного сигнала NLOS;  $\omega_n, \phi_n$  – сдвиг частоты и фазы  $n$ -го компонента многопутности NLOS;  $L_n$  – потеря сигнала для  $n^{ro}$  пути NLOS.

В этом исследовании проанализировано поведение распространения обратного сигнала в беспроводных системах связи и предложена модель, включающая адаптивный выбор пути распространения сигнала. Применяя адаптивные алгоритмы, система динамически оценивает и выбирает оптимальный обратный путь по критерию максимуму отношения сигнал/шум на основе условий распространения сигнала в реальном времени, таких как задержка, потери и угловое выравнивание. Сравнение между компонентами прямой видимости (LOS) и непрямой видимости (NLOS) показало, что путь LOS обеспечивает превосходное качество сигнала с уменьшенной многопутной интерференцией и меньшими потерями при распространении сигнала. Следовательно, адаптивный алгоритм последовательно определил путь LOS как наиболее эффективный обратный канал. Однако при затенении базовой станции относительно мобильной выбирается путь с отражением от объектов на основе того же критерия. Следует заметить, что этот критерий может быть использован, если нет воздействия активных помех. Если есть внешние помехи, то необходимо использовать критерий минимума среднеквадратической ошибки приёма кодов пилот-поднесущих OFDM или сигнала синхронизации, которые известны в приемниках как базовой, так и мобильной станций.

**В третьем разделе** представлена структурная схема беспроводной системы связи, показанная на рисунке 2, на котором присутствуют основные узлы преобразования сигнала. При этом исходная информация передается на вход кодера, который выполняет помехоустойчивое кодирование по мере

необходимости. Затем информационный поток передается на цифровой модулятор, где одна из схем модуляции модулируется. Следующим шагом является пространственно-временное кодирование, которое разделяет данные на отдельные пространственные потоки.

Основной проблемой в беспроводной среде при плотной застройке местности является борьба с множеством отраженных сигналов, которые приводят к искажениям сигнала в приемнике. Задачей адаптивного алгоритма является формирование пространственной характеристики направленности антенны путем весовой обработки сигналов с выходов антенны. В качестве критерия адаптации выбран критерий максимизации средней мощности на выходе приемника. Такой подход позволяет из всех отраженных сигналов и прямого пути (при его наличии) выделить путь прихода сигнала, который имеет максимальную мощность, и отфильтровать сигналы остальных путей<sup>8</sup>.

Сигнал на выходе адаптивного блока имеет вид

$$\mathbf{Y}(t) = \sum_{i=1}^N w_i x_i(t) = \mathbf{W}^H \mathbf{X}(t), \tag{4}$$

где  $x_i$  – входной сигнал;  $N$  – количество элементов АР в блоке адаптации;  $w_i$  – весовой вектор.

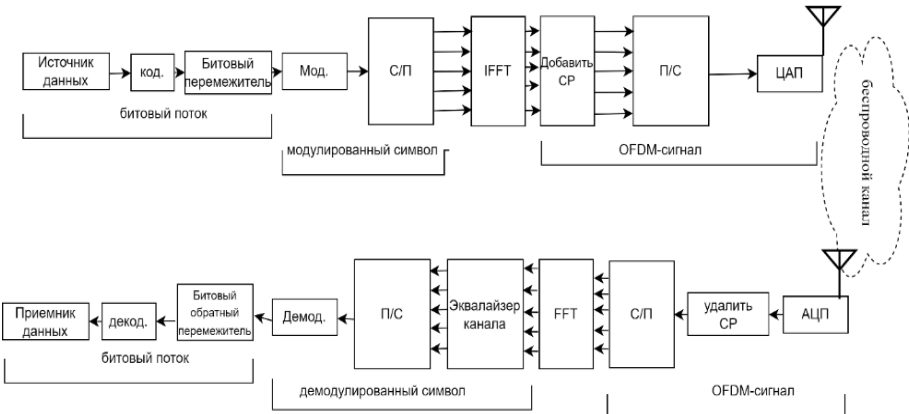


Рисунок 2 – Обобщенная структурная схема системы беспроводной связи

Входной сигнал представлен в виде суммы полезного сигнала и шума

$$\mathbf{X}(t) = \mathbf{S}(t) + \mathbf{N}(t). \tag{5}$$

Эрмитова матрица обеспечивает разложение на собственные числа и собственные вектора  $\mathbf{R}_{xx} = \mathbf{V}\mathbf{\Lambda}\mathbf{V}^H$ . Диагональные элементы матрицы собственных значений соответствуют мощности сигналов путей, а собственные вектора данной

<sup>8</sup>Джамил Джалил Садун Джамил. Адаптивный алгоритм передачи изображений по беспроводной линии связи на основе ММО-принципа : специальность 2.2.13 "Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук [Текст] / Джамил Джалил Садун Джамил, 2023. — 143 с.

матрицы являются весовыми коэффициентами для адаптации в приемной антенной решетке. На основе приведенного, сигнал после адаптивной обработки, можно представить как  $Y_w = H_w X + N$ , где  $H_w$  – матрица канала после применения весового вектора.

Блок адаптивной обработки сигналов показан на рисунке 3.

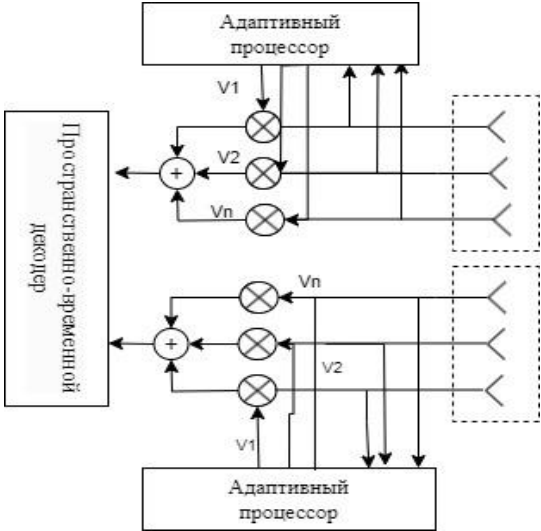


Рисунок 3 – Структурная схема блока адаптивной обработки

**В четвертом разделе** выполнено моделирование беспроводной системы связи WiMAX в среде с переотражениями. Выбраны и обоснованы параметры модулируемой среды, а также параметры сигналов и характеристики направленности антенн. Для сравнительного анализа эффективности алгоритма представлены графики вероятности битовой ошибки при различных конфигурациях беспроводной системы. Построены графики эффективности системы с применением различных видов модуляции, канального кодирования и алгоритма адаптивной обработки сигналов. На рисунках 4 и 5 [2] показано, как зависит вероятность ошибки для систем связи при различных видах цифровой манипуляции поднесущих OFDM-сигнала для систем SIMO.

На рисунках 4 и 5 показано, как зависит вероятность ошибки для систем связи при различных видах цифровой манипуляции поднесущих OFDM-сигнала для систем SIMO от отношения сигнал/шум.

Так как пропускная способность увеличивается с ростом количества пространственных потоков, то рассмотрено, как изменяется эта способность при различном количестве приемных и передающих антенн для системы MIMO-OFDM на рисунках 6, 7. Адаптивная обработка сигналов показала существенное снижение вероятности битовой ошибки и в системе MIMO-OFDM (рисунки 6, 7).

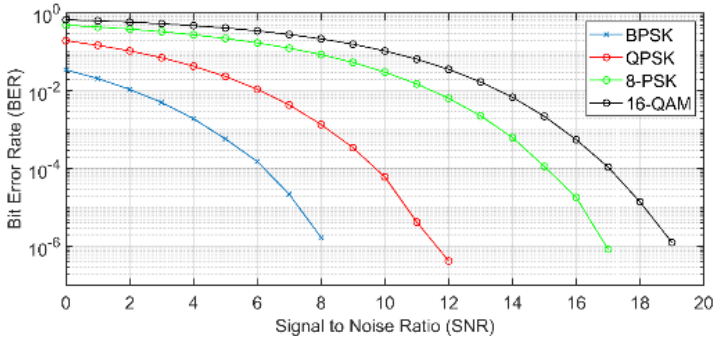


Рисунок 4 – Коэффициент ошибок по битам BER (в случае, если адаптивный алгоритм не применяется) SIMO

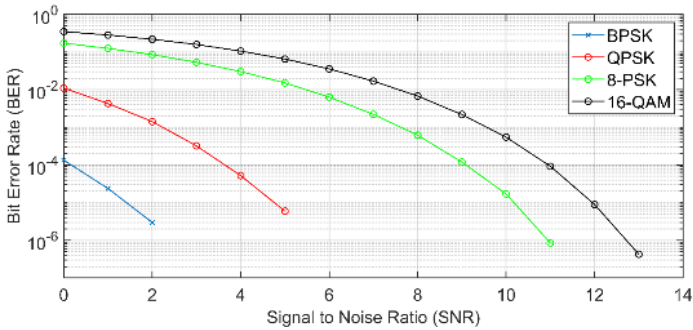


Рисунок 5 – Коэффициент ошибок по битам BER (в случае, если применяется адаптивный алгоритм) SIMO

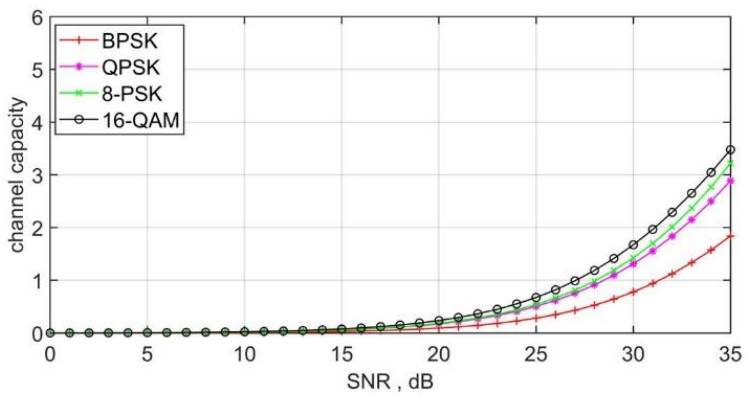


Рисунок 6 – Пропускная способность для различных видов модуляции без адаптивного алгоритма для системы MIMO-OFDM

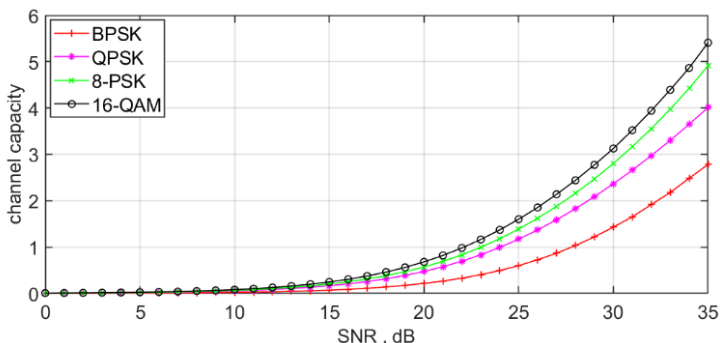
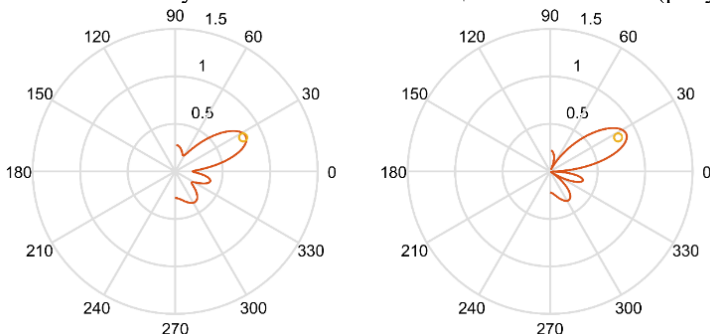


Рисунок 7 – Пропускная способность для тех же видов модуляции сочетании с адаптивным алгоритмом для системы MIMO-OFDM

В процессе адаптации в качестве оптимального пути был выбран прямой путь, который имеет наибольшую мощность. Это наглядно демонстрирует диаграмма направленности антенны с учетом весовой обработки, благодаря адаптивному алгоритму для всех антенн одновременной работы как на базовой станции, так и на мобильной станции. были избраны именно такие направления, применение которых предоставляет возможность максимизировать направленность ХН AP на путь с максимальной мощностью сигнала. (рисунок 8).



а) ДН AP мобильной станции

б) ДН AP базовой станции

Рисунок 8 – Адаптированная характеристика направленности для системы MIMO-OFDM

В системах MIMO блок адаптации работает аналогично для каждой приёмной антенны решётки. Как и для систем MIMO-OFDM пространственная фильтрация снижает вероятность битовой ошибки в системе MIMO-OFDM, что отражено на рисунках 9, 10, 11, 12. Повышение помехоустойчивости позволяет использовать многопозиционные виды манипуляции на поднесущих OFDM-сигнала, что увеличивают скорость передачи данных по каналу связи при неизменной полосе частот. Если прямой путь отсутствует в результате затенения базовой станции, тогда многопутное распространение играет важную роль, т.к. позволяет обеспечить передачу данных между передатчиком и приемником в условиях

отсутствия прямой видимости, при этом вероятность ошибки будет изменяться, как показано на рисунках 9, 10, 11, 12 [5,6].

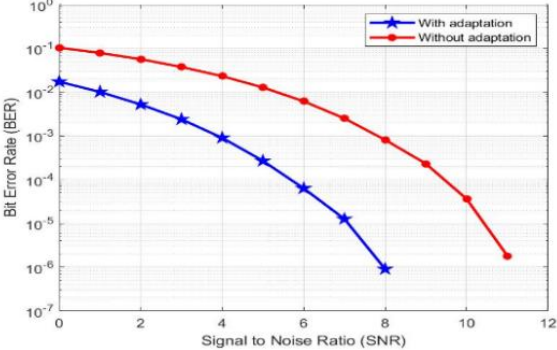


Рисунок 9 – Вероятность битовой ошибки для системы MIMO-OFDM с модуляцией BPSK при адаптации и без нее

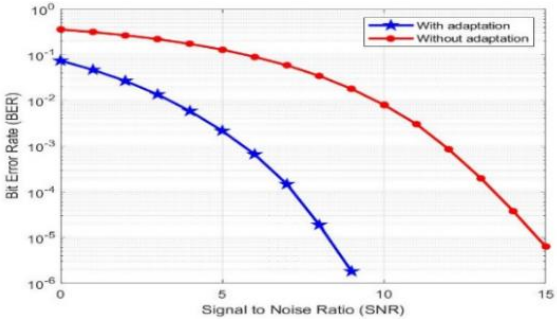


Рисунок 10 – Вероятность битовой ошибки для системы MIMO-OFDM с модуляцией QPSK при адаптации и без нее

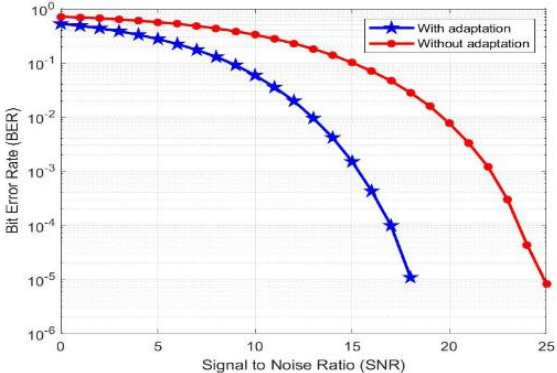


Рисунок 11 – Вероятность битовой ошибки для системы MIMO-OFDM с модуляцией 8-PSK при адаптации и без нее

На графиках рисунков 9, 10, 11, 12, показано, что использование адаптивного алгоритма в системах связи с пространственным кодированием приводит к снижению вероятности ошибки в 50 раз, когда отношение сигнал/шум достигает 6 дБ или выше.

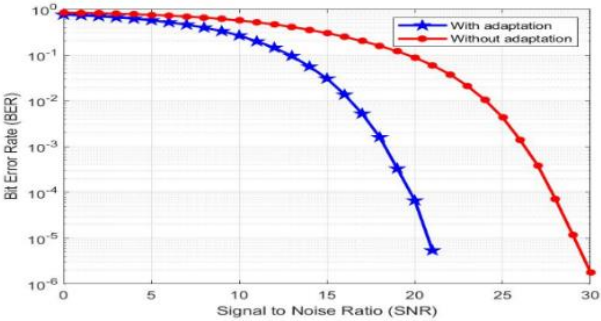


Рисунок 12 – Вероятность битовой ошибки для системы MIMO-OFDM с модуляцией 16-QAM при адаптации и без нее

Среда распространения сигнала может не иметь прямого пути из-за эффекта затенения мобильной станции по отношению к базовой станции. В этом сценарии многолучевое распространение облегчает передачу данных между приемником и передатчиком даже при отсутствии прямой видимости. Этот сценарий часто встречается в радиосвязи в городских условиях. В работе исследуются последствия отсутствия прямого пути для результатов адаптивной обработки, представленных на рисунке 13.

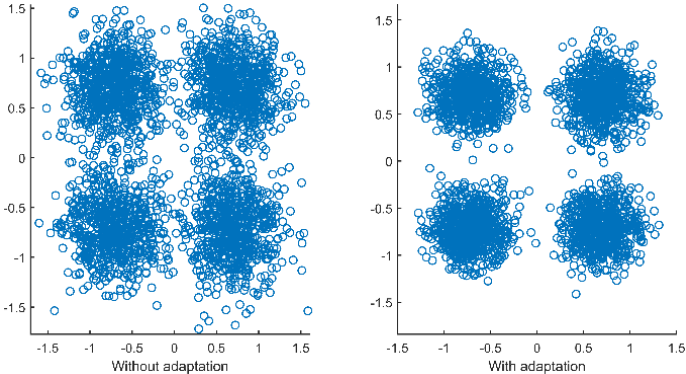


Рисунок 13 – Сигнальное созвездие сигнала приемника с адаптивной обработкой и без нее при отсутствии прямой видимости

Результаты, представленные на рисунке 13 демонстрируют, что адаптивный алгоритм пространственной фильтрации может эффективно справляться с многопутным распространением в среде WiMAX, как с прямым каналом, так и без

него. Адаптация положительно влияет на пропускную способность канала, что можно увидеть, используя формулу для приемника с весовой обработкой сигнала. Адаптивный алгоритм положительно влияет не только на уменьшение частоты появления ошибок по битам.

Кодирование с исправлением ошибок может быть реализовано в пространственных системах MIMO-OFDM. Исследована связь между кодами Хэмминга и системой MIMO 3x3, изображенная на рисунке 14, которая использует идентичные параметры кодирования. Было определено, что адаптивный алгоритм дает выигрыш до 3 дБ при реализации, в то время как он дает выигрыш до 2 дБ при нереализованной реализации. Коды Хэмминга не являются эффективным инструментом для кодирования с исправлением ошибок.

Поэтому были рассмотрены коды Рида-Соломона в качестве альтернативы (рисунок. 15). Этот тип кода предлагает более эффективное кодирование исходной информации для исправления неправильно полученных битов. Избыточность кодирования должна быть идентичной для оценки результатов, полученных с помощью кодов Рида-Соломона и с помощью кодов Хэмминга [1].

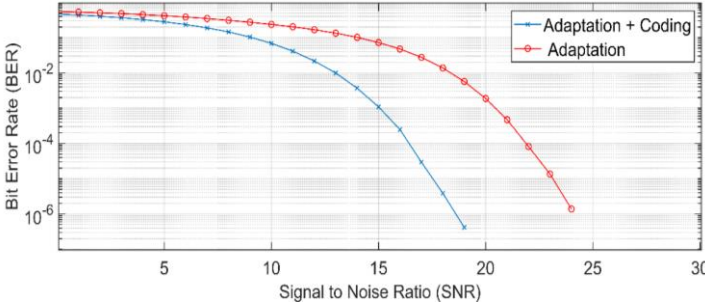


Рисунок 14 – Вероятность битовой ошибки MIMO-OFDM-алгоритма при адаптации и коды Хэмминга

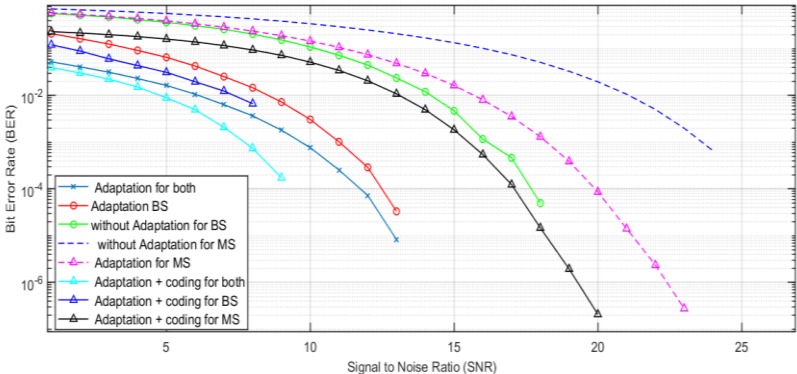


Рисунок 15 – BER для системы 3 x 3 MIMO-OFDM на базовых и мобильных станциях с алгоритмами адаптации и кодами Рида-Соломона

Как показано на рисунке 15, содержит данные о том, как менялись значения вероятность появления битовых ошибок в зависимости от того, как производились манипуляции, связанные с адаптацией; в зависимости от того, как велись манипуляции, связанные с кодированием.

Благодаря сопоставительному анализу можно выяснить, что в том случае, когда применяется адаптация (только на мобильном устройстве), вероятность появления битовых ошибок сокращается более чем в 1.8 раза (по сравнению с тем сценарием, когда адаптация не осуществляется). Если же адаптация будет произведена как на мобильном устройстве, так и на базовой станции, то падение вероятности битовых ошибок станет более чем стократным. Самым же эффективным становится результат тогда, когда адаптация ведётся одновременно на всех станциях, при этом кодирование ведётся по алгоритму Рида-Соломона: в данном случае снижение вероятности битовых ошибок станет более чем шестисоткратным [3].

Сведения о результатах моделирования сведены в таблицу 1.

Таблица 1. Результаты моделирования

№	Название исследования	Условие моделирования	Значение BER
1.	Adaptation for both	Адаптация одновременно на базовой BS и мобильной MS станциях	$3,7 \cdot 10^{-3}$
2.	Adaptation BS	Адаптация только на базовой BS станции	$1,5 \cdot 10^{-2}$
3.	without Adaptation for BS	без Адаптации на базовой BS станции	$2 \cdot 10^{-1}$
4.	without Adaptation for MS	без Адаптации на мобильной MS станции	$4,5 \cdot 10^{-1}$
5.	Adaptation for MS	Адаптация только на мобильной MS станции	$2,5 \cdot 10^{-1}$
6.	Adaptation + coding for both	Адаптация и кодирование одновременно на базовой BS и мобильной MS станциях	$7 \cdot 10^{-4}$
7.	Adaptation+ coding for BS	Адаптация и кодирование только на базовой BS станции	$7 \cdot 10^{-3}$
8.	Adaptation+ coding for MS	Адаптация и кодирование только на мобильной MS станции	$9 \cdot 10^{-2}$

**В заключении** диссертации рассмотрены решенные проблемы современной беспроводной связи путем разработки и анализа адаптивного алгоритма передачи данных на основе технологии MIMO-OFDM. В исследовании предлагается комплексная структура, которая моделирует трехмерный многолучевой канал связи WiMAX и реализует передовые методы пространственно-временной обработки сигналов.

Основной вклад заключается в разработке и моделировании адаптивного алгоритма, применяемого одновременно как на базовой станции, так и на мобильной станциях. Это двухстороннее развертывание адаптивного алгоритма значительно улучшило производительность системы за счет динамического управления диаграммами направленности антенн в направлении самых благоприятных путей сигнала и подавления сигналов других путей. В результате были достигнуты заметные сокращения частоты ошибок по битам и улучшения спектральной эффективности и пропускной способности при различных схемах модуляции и значениях SNR.

Результаты моделирования подтвердили, что интеграция адаптивной обработки сигнала как в точках передачи, так и приема дает явные преимущества

в многолучевых и непрямолинейных средах. Более того, добавление кодов коррекции ошибок, особенно кодирования Рида-Соломона, еще больше повысило надежность передачи данных по беспроводным каналам.

Предлагаемая модель распространения обратного сигнала интегрирует адаптивный выбор угла для повышения надежности и эффективности связи между передатчиком и приемником. Благодаря реализации адаптивных алгоритмов система способна непрерывно анализировать среду распространения и выбирать наиболее благоприятный обратный путь. Этот динамический подход учитывает критические параметры, такие как сила сигнала, задержка, угловая ориентация и уровни помех. Среди различных возможных обратных путей, включая те, которые включают отражения от зданий или земли, алгоритм последовательно отдает предпочтение пути прямой видимости (LOS) из-за его минимальных потерь и меньшей восприимчивости к искажениям многолучевого распространения.

Выделяя и используя только компонент LOS в уравнении обратного сигнала, модель эффективно упрощает общую сложность системы, не жертвуя производительностью. Механизм адаптивного выбора не только улучшает точность сигнала, но и поддерживает масштабируемое развертывание в сложных, динамических беспроводных средах. Эта методология подчеркивает важность оптимизации в реальном времени в системах связи следующего поколения и прокладывает путь для более интеллектуальных и отзывчивых конструкций беспроводных соединений. Представленное здесь математическое моделирование подтверждает преимущества использования адаптивных методов выбора обратного пути и то, что сосредоточение внимания на пути LOS обеспечивает надежную и эффективную основу для высокопроизводительной передачи и приема сигнала.

Подводя итог, можно утверждать, что совместное применение адаптивных алгоритмов на обоих концах линии связи в сочетании с пространственной фильтрацией и надежными схемами кодирования обеспечивает надежное и эффективное решение для высококачественной беспроводной передачи данных в современных системах связи.

## **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Статьи в научных изданиях, входящих в Перечень ВАК**

1. Федосов, В. П. Пространственно-временной адаптивный алгоритм с использованием кода Хэмминга на основе модели беспроводного канала 3D-MIMO / В. П. Федосов, В. М. М. Д. Аль-Мусави, С. В. Кучерявенко // Радиотехника. – 2024. – Т. 88, № 7. – С. 169-176. – DOI 10.18127/j00338486-202407-27 (K1).

2. Федосов, В. П. Адаптивный алгоритм обработки пространственно-временных сигналов для передачи данных в канале 3D WIMAX на основе принципов SIMO-OFDM / В. П. Федосов, В. М. М. Д. Аль-Мусави, С. В. Кучерявенко // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2025. – № 1(243). – С. 37-45. – DOI 10.18522/2311-3103-2025-1-37-45 (K2).

3. Федосов, В. П. Оптимизация адаптивного пространственно-временного алгоритма в мобильной и базовой станциях связи в системе MIMO с кодом Рида-

Соломона / В. П. Федосов, В. М. М. Д. Аль-Мусави, С. В. Кучерявенко // Радиотехника. – 2025. – Т. 89, № 6. – С. 60-67. – DOI 10.18127/j00338486-202506-06. (K1).

4. Федосов, В. П. Адаптивный алгоритм обработки пространственно-временных сигналов с кодированием Рида-Соломона для трехмерной модели беспроводного канала радиосвязи / В. П. Федосов, В. М. М. Д. Аль-Мусави, С. В. Кучерявенко // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2025. – № 3(245). – С. 81-90. – DOI 10.18522/2311-3103-2025-3-81-90. (K2).

#### **Публикации в сборниках трудов конференций**

5. Fedosov, V. P. Transmission Data in 3D Channel Using Adaptive Algorithm Based on The MIMO-OFDM in a Densely Built- Up Area / V. P. Fedosov, W. M. Al-Musawi, S. V. Kucheryavenko // 2023 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves RSEMW, Divnomorskoe Krasnodar Region Russia June 26–30, 2023 : Proceedings of the Conference. – IEEE, 2023. – P. 240-243. – DOI 10.1109/RSEMW58451.2023.10202027.

6. Аль-Мусави, В. М. М. Д. Оптимизация передачи данных по беспроводному каналу на основе адаптивного алгоритма с использованием систем MIMO-OFDM / В. М. М. Д. Аль-Мусави // Научная инициатива иностранных студентов и аспирантов: сборник докладов III Международной научно-практической конференции, 25–27 апреля 2023 г. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2023. – С. 263-269.

7. Федосов, В. П. Анализ и сравнение адаптивного алгоритма в системах SISO и MIMO для канала 3D-WIMAX в условиях функционирования беспилотных летательных средств в районе с плотной застройкой / В. П. Федосов, В. М. М. Д. Аль-Мусави // Компьютерные и информационные технологии в науке, инженерии и управлении "КомТех-2023": материалы Всероссийской научно-технической конференции с международным участием: в двух томах. Т. 1. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2023. – С. 50-56.

8. Аль-Мусави, В. М. М. Д. Анализ эффективности адаптивных пространственно-временных алгоритмов в системах SIMO-OFDM с улучшенным кодированием Рида-Соломона / В. М. М. Д. Аль-Мусави // Научная инициатива иностранных студентов и аспирантов: сборник докладов V Международной научно-практической конференции, 22–24 апреля 2025 г. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2025. – С. 127-131.

#### **Патенты/Свидетельства**

9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025663672 Российская Федерация. Программная реализация адаптивного алгоритма обработки сигналов в MIMO-системе радиосвязи: заявл. 15.05.2025; опубл. 29.05.2025 / В. П. Федосов, В. М. М. Д. Аль-Мусави; заявитель федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет».

Аль-Мусави Висам Мохаммедтаки М Джавад

**Адаптивный алгоритм обработки пространственно-временных сигналов в ММО-системе радиосвязи для базовой и мобильной станций**

Автореф. диссертации на соискание ученой степени канд. техн. наук

Подписано в печать 16.10. 2025 г.  
Бумага офсетная. Формат 60x84 1/16. Тираж 100 экз.  
Усл. печ. лист. 1,0. Уч. изд. л. 1,0. Заказ № 56

Отпечатано в отделе полиграфии центра услуг «Караван», ИНН 615400225064  
347922, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 63, тел 8-928-600-8000.