

Нгием Ван Донг

**ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ММО ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ
СПЕКТРАЛЬНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ БЕСПРОВОДНЫХ
СИСТЕМ СВЯЗИ**

Специальность: 2.2.13. Радиотехника, в том числе системы и устройства
телевидения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2026

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» (МФТИ, Физтех).

Научный руководитель: **Дворкович Александр Викторович**, доктор технических наук, член-корреспондент РАН, заведующий кафедрой мультимедийных технологий и телекоммуникаций МФТИ.

Официальные оппоненты: **Приоров Андрей Леонидович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры цифровых технологий и машинного обучения Ярославского государственного университета им. П.Г. Демидова (ЯрГУ им. П. Г. Демидова).

Тимохин Илья Сергеевич, кандидат наук по прикладной математике, ведущий аналитик Управления бизнес-технологий Региональный центр разработки Общества с ограниченной ответственностью «ТЦР».

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина» (ФГБОУ ВО РГРТУ).

Защита диссертации состоится « 17 » декабря 2026 г. в 13.00 на заседании диссертационного совета по защите докторских и кандидатских диссертаций 55.2.002.01 при Ордена Трудового Красного Знамени федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский технический университет связи и информатики» (МТУСИ) по адресу: 111024, г. Москва, ул. Авиамоторная, д. 8а, ауд А-211.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте МТУСИ <https://dis.mtuci.ru/upload/srd/Dis-NgiemVanDong/dis-NgiemVanDong.pdf>

Автореферат разослан « 15 » октября 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного совета 55.2.002.01, к.т.н., доцент

В.М. Сахарчук

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Современное развитие информационного общества связано с постоянным ростом объема передаваемых данных, увеличением числа беспроводных устройств и повышением требований к надежности, скорости и устойчивости связи. В этих условиях радиочастотный ресурс становится одним из наиболее дефицитных ресурсов телекоммуникационных систем. Простое расширение полосы частот не может рассматриваться как универсальный путь развития, поэтому особое значение приобретают методы, позволяющие увеличивать полезную пропускную способность без привлечения дополнительного спектра.

Одним из наиболее перспективных направлений решения этой задачи является применение технологии MIMO (Multiple Input Multiple Output), основанной на использовании нескольких передающих и приемных антенн. Технология MIMO позволяет формировать несколько пространственных потоков данных, повышать устойчивость приема при многолучевом распространении и эффективнее использовать имеющуюся полосу частот. В системах 4G, 5G, Wi-Fi, перспективных системах широкополосного доступа и системах связи с повышенными требованиями к покрытию MIMO является ключевым инструментом повышения спектральной (SE) и энергетической эффективности (EE).

Вместе с тем практическое применение MIMO-систем сопровождается рядом ограничений. Увеличение числа антенных каналов повышает вычислительную сложность обработки, усиливает требования к оценке состояния канала, синхронизации и подавлению межканальной интерференции. В нестационарных частотно-селективных каналах эффективность известных схем пространственно-временного и пространственно-частотного кодирования существенно зависит от доплеровского сдвига, частотной корреляции, уровня шума, пилотной нагрузки и характеристик аппаратной реализации. Поэтому задача повышения спектральной эффективности MIMO-систем не сводится только к росту числа антенн или увеличению мощности передачи.

Актуальность диссертационного исследования определяется необходимостью разработки методов оценки и алгоритмов повышения спектральной эффективности беспроводных систем связи с MIMO, учитывающих не только предельную пропускную способность канала, но и реальные ограничения: отношение сигнал/шум (SNR), отношение сигнал/интерференция-плюс-шум (SINR), вероятность битовой ошибки (BER), пилотную нагрузку, межканальную интерференцию, энергетические затраты и вычислительную сложность обработки сигналов. Такой подход позволяет рассматривать спектральную эффективность как комплексный показатель качества функционирования MIMO-канала в реальной сигнально-помеховой обстановке.

Степень разработанности темы исследования определяется широким кругом исследований в области построения многоантенных систем связи, оценки пропускной способности ММО-каналов, пространственного разделения информационных потоков, повышения спектральной и энергетической эффективности, а также помехоустойчивой обработки сигналов. Теоретические основы ММО-систем сформированы в работах G.J. Foschini, M.J. Gans и E. Telatar. Значительный вклад в развитие пространственно-временного кодирования и практического построения ММО-систем внесли S.M. Alamouti, V. Tarokh, A.J. Paulraj, D. Gesbert и H. Bölcskei.

Существенный массив работ посвящён массивным системам ММО (Massive MIMO), пространственному мультиплексированию пользователей, построению больших антенных решёток и исследованию компромисса между спектральной и энергетической эффективностью. Данные направления развиваются в работах T.L. Marzetta, E.G. Larsson, E. Björnson, M. Debbah, J. Hoydis, S.T. Brink, H.Q. Ngo, H. Halbauer, A. Weber, D. Wiegner и T. Wild. В них рассматривается влияние количества антенн и пользователей, распределения мощности и параметров канала на пропускную способность и энергопотребление ММО-систем.

Отдельное направление составляют исследования совместного применения ортогонального частотного мультиплексирования (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM) и многоантенных технологий, а также методов пространственно-временного блочного кодирования (Space-Time Block Coding, STBC), пространственно-частотного блочного кодирования (Space-Frequency Block Coding, SFBC) и пространственно-частотно-временного блочного кодирования (Space-Frequency-Time Block Coding, SFTBC). Значительный вклад в данное направление внесли L. Hanzo, J. Akhtman, L. Wang, H.G. Yeh, A. Al-Dweik, S. Muhaidat, F. Kalbat, C.A. Medina и R. Sampaio-Neto. В их работах исследованы способы повышения устойчивости систем к многолучевому распространению, частотной избирательности и нестационарности канала.

В Российской научной школе вопросы развития ММО и Massive MIMO-систем, повышения их пропускной способности и помехоустойчивости рассматриваются в работах В.Б. Крейнделина, М.Г. Бакулина, В.Г. Карташевского, Г.А. Фокина и Е.И. Глушанкова. Анализ исследований показывает, что при высокой степени разработанности отдельных компонентов ММО-систем сохраняется методологический разрыв между задачами повышения скорости передачи, обеспечения помехоустойчивости и ограничения вычислительной сложности. Исследования, выполненные автором, направлены на устранение указанного методологического разрыва.

Цели и задачи исследования. Целью диссертационной работы является разработка методов оценки и повышения спектральной эффективности беспроводных систем связи с применением технологии ММО и учетом ограничений практической реализации.

Для достижения цели в работе поставлены следующие задачи:

1. Провести анализ существующих методов оценки и повышения спектральной эффективности ММО-систем и определить их ограничения в реальной сигнально-помеховой обстановке.
2. Разработать метод многокритериальной оценки спектральной эффективности ММО-систем, совместно учитывающий полезную пропускную способность, пилотную нагрузку, отношение сигнал/шум, вероятность битовой ошибки, энергетические и вычислительные затраты.
3. Усовершенствовать метод адаптивного пространственного кодирования сигналов и разработать алгоритм выбора режима обработки с учётом отношения сигнал/шум, доплеровского сдвига, временной и частотной корреляции ММО-канала.
4. Разработать метод формирования комплексных весовых коэффициентов антенных каналов в составе адаптивной пространственно-временной обработки ММО-сигналов, предусматривающий оценку текущей сигнально-помеховой обстановки, адаптивную настройку весов пространственного фильтра по известному критерию минимизации выходной мощности помехи и последующую временную фильтрацию остаточной составляющей ошибки. Усовершенствовать способ компенсации ошибок за счёт последовательного применения пространственной и временной фильтрации.

Объектом исследования является процесс передачи и обработки сигналов в беспроводных системах связи с использованием технологии ММО в условиях шумов, многолучевых замираний и межканальной интерференции.

Предметом исследования являются алгоритмы оценки и методы повышения спектральной эффективности в беспроводных системах связи с использованием технологии ММО на основе адаптивного пространственного кодирования, пространственно-временной фильтрации, спектральной координации сигналов и компенсации ошибок без расширения используемой полосы частот.

Методология и методы исследования. В работе применены методы цифровой обработки сигналов, математического моделирования, теории вероятностей, дискретной математики, теории потенциальной помехоустойчивости, теории оптимизации и имитационного моделирования.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработан метод многокритериальной оценки спектральной эффективности ММО-систем, отличающийся от известных подходов совместным учётом пропускной способности, пилотной нагрузки, SNR/SINR, BER, энергетической эффективности и вычислительной сложности. Метод позволяет оценивать не только теоретическую скорость передачи, но и устойчивость ММО-системы в реальной сигнально-помеховой обстановке.

2. Усовершенствован метод адаптивного пространственного кодирования ASC, отличающийся детерминированным ситуационным выбором режима пространственного кодирования SFBC, STBC, пространственно-частотного кодирования (SF) или пространственно-временного блочного кодирования с преобразованием Уолша–Адамара и комплементарных последовательностей (WHSTBC-CC) по совокупности текущих параметров канала: отношения сигнал/шум, размера сигнального ансамбля, нормированного доплеровского сдвига, коэффициентов временной и частотной корреляции. Разработанный алгоритм объединяет оценку состояния канала, адаптивный выбор модуляции, расчёт корреляционных параметров и выбор пространственного кода в единую процедуру обработки.

3. Разработан метод формирования комплексных весовых коэффициентов антенных каналов в составе адаптивной пространственно-временной обработки ММО-сигналов, предусматривающий оценку текущей сигнально-помеховой обстановки, адаптивную настройку весов пространственного фильтра по известному критерию минимизации выходной мощности помехи и последующую временную фильтрацию остаточной составляющей ошибки. Усовершенствован способ компенсации ошибок за счёт последовательного применения пространственной и временной фильтрации.

Теоретическая значимость работы состоит в развитии методов комплексной оценки спектральной эффективности ММО-систем с учетом не только пропускной способности, но и качества пространственного разделения, вероятности ошибки, пилотной нагрузки, интерференции и вычислительной сложности. Предложенные модели и зависимости расширяют аппарат анализа ММО-каналов в условиях многолучевого распространения и нестационарности.

Практическая значимость работы состоит в возможности использования разработанных методов при построении программно-аппаратных средств обработки сигналов в беспроводных системах ММО. Результаты работы использованы компанией E-STARS (Вьетнам) при разработке программно-аппаратных средств передачи данных: применены алгоритмические решения по спектральной

координации и адаптивной обработке сигналов MIMO-OFDM, предназначенные для оценки состояния канала и снижения влияния межканальной интерференции. Программно-аппаратная апробация соответствующих решений выполнена в комплексе MIMO-OFDM 2×2 с двухканальными приёмопередатчиками AD9361 и FPGA.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Метод многокритериальной оценки спектральной эффективности MIMO-систем, который, в отличие от подходов, основанных только на отношении скорости передачи к полосе частот, дополнительно учитывает пилотную нагрузку, SNR/SINR, BER, межканальную интерференцию, энергетические и вычислительные затраты. Это обеспечивает более полную оценку эффективности системы в реальных условиях функционирования.

2. Усовершенствованный метод адаптивного пространственного кодирования (ASC), обеспечивающий ситуационный выбор режима обработки по текущим параметрам нестационарного частотно-селективного канала. По сравнению с известным комбинированным методом пространственно-временного и пространственно-частотного кодирования (ST-SF) предложенный метод обеспечивает энергетический выигрыш 2,5–4,0 дБ при вероятности ошибки $P_p = 7 \cdot 10^{-3} \dots 3 \cdot 10^{-2}$.

3. Метод формирования комплексных весовых коэффициентов антенных каналов в составе адаптивной пространственно-временной обработки MIMO-сигналов, предусматривающий оценку текущей сигнально-помеховой обстановки, адаптивную настройку весов пространственного фильтра по известному критерию минимизации выходной мощности помехи и последующую временную фильтрацию остаточной составляющей ошибки. Последовательное применение пространственной и временной фильтрации обеспечивает сначала разделение полезных потоков и подавление межканальной интерференции, а затем снижение влияния шумов, замираний и временной нестабильности канала.

Личный вклад автора. Все основные результаты, составляющие содержание диссертации, получены соискателем самостоятельно.

Степень достоверности и апробация результатов. Основные положения и результаты исследования были представлены и обсуждены на международных научно-практических конференциях:

1. VIII Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем» РАДИОИНФОКОМ-2024, Москва, 2024 г.

2. 9th International Conference on Information, Control, and Communication Technologies ICCT-2025, Гомель, Беларусь, 2025.
3. IX Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем» РАДИОИНФОКОМ-2025, Москва, 2025.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 6 научных работ, в том числе 2 статьи в научных изданиях, рекомендованных ВАК (К2), 1 статья в изданиях, индексируемых в международной базе данных SCOPUS, 1 свидетельство о регистрации программ для ЭВМ, 2 доклада в сборниках трудов международных конференций.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трех разделов, заключения и списка литературы из 164 наименований. Общий объем диссертации составляет 175 страниц, включая 61 рисунок и 12 таблиц.

Соответствие паспорту специальности. Проведенное автором исследование соответствует:

п. 5 «Разработка и исследование алгоритмов, включая цифровые, обработки сигналов и информации в радиотехнических устройствах и системах различного назначения, в том числе синтез и оптимизация алгоритмов обработки». Соответствие п. 5 паспорта специальности определяется разработкой автором алгоритма ситуационного выбора режима обработки в ММО-системе, объединяющего оценку состояния канала, выбор модуляции, расчёт параметров временной и частотной корреляции, выбор режима пространственного кодирования и подавление межканальной интерференции в единую адаптивную процедуру. При этом схемы STBC, SFBC, WHSTBC-CC и SF используются как известные базовые способы пространственного кодирования, а научный результат автора состоит в алгоритме их адаптивного выбора по совокупности текущих параметров нестационарного частотно-селективного канала. Кроме того, усовершенствована организация пространственно-временной обработки за счёт последовательного применения пространственной и временной фильтрации.

п. 6 «Разработка и исследование методов и алгоритмов обработки сигналов и информации в радиотехнических устройствах и системах различного назначения, включая системы телевидения и передачи информации, при наличии помех с целью повышения помехоустойчивости» паспорта специальности 2.2.13. Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения. Соответствие п. 6 паспорта специальности определяется разработкой и исследованием методов обработки сигналов, направленных на повышение полезной пропускной способности и спектральной эффективности ММО-систем при сохранении требуемой достоверности передачи. Усовершенствованный метод ASC обеспечивает

адаптивный выбор режима кодирования в зависимости от SNR, доплеровского сдвига и временной и частотной корреляции канала; пространственно-временная обработка обеспечивает подавление межканальной интерференции, шумов и замираний. Полученные результаты моделирования подтверждают повышение пропускной способности и помехоустойчивости системы без расширения используемой полосы частот.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении пояснена актуальность применения MIMO для повышения спектральной эффективности беспроводных систем связи. Показано, что важной научной проблемой является совместная оценка пропускной способности, помехоустойчивости и вычислительной сложности MIMO-систем, поскольку увеличение числа антенн само по себе не гарантирует оптимального результата. Во введении сформулированы цель, задачи, объект, предмет, научная новизна и положения, выносимые на защиту.

В первом разделе «Обзор современных беспроводных систем связи и методов повышения спектральной эффективности» проанализированы принципы построения MIMO и massive MIMO, частотные диапазоны беспроводных систем связи, методы зондирования спектра, динамического распределения каналов и практические способы уменьшения взаимного влияния каналов.

Во втором разделе «Разработка методов оценки спектральной эффективности систем связи с использованием технологии MIMO» начинается основная расчетная часть диссертации. Здесь предложен комплексный подход к оценке SE/EE MIMO-систем: учитываются massive MIMO, полезная пропускная способность, пилотная нагрузка, BER, SNR/SINR, энергетическая эффективность и вычислительная сложность схем обработки. Поэтому именно второй раздел показывает, как количественно оценивать, какая схема обработки лучше в реальных условиях.

В подразделе 2.1 проанализированы особенности MIMO, MU-MIMO и massive MIMO как средств повышения пропускной способности без расширения частотной полосы. Показано, что реальная спектральная эффективность определяется не только числом антенн, но также качеством пространственного разделения потоков, состоянием канала, межканальной интерференцией, пилотной нагрузкой, энергозатратами и вычислительной сложностью. Эти результаты служат основой для разработанного далее метода количественной оценки спектральной эффективности MIMO-систем.

В подразделе 2.2 разработана расчетная основа оценки спектральной и энергетической эффективности. Спектральная эффективность определяется как полезная скорость передачи, отнесенная к используемой полосе частот:

$$\eta_{SE} = \frac{R_{\text{полезн}}}{B}, \quad (1)$$

где $R_{\text{полезн}}$ — скорость передачи полезной информации с учётом служебных и пилотных сигналов; B — занимаемая полоса. В предложенном методе эта величина оценивается совместно с пилотной нагрузкой, SNR/SINR, BER, EE и вычислительной сложностью.

В подразделе 2.2 сначала определяется достижимая SE для базовой MIMO-ячейки с одним активным пользовательским устройством:

$$SE_0 = \log_2(1 + (M - 1)SNR_0) = \log_2(1 + (M - 1)\frac{p}{\sigma^2}\beta_0^0), \quad (2)$$

где M — число антенн БС; p — мощность передачи; β_0^0 — среднее усиление полезного канала; σ^2 — дисперсия шума (равная мощности шума в гауссовском канале). Формула (2) показывает, каким образом рост M и отношения полезного сигнала к шуму увеличивает SE.

Энергетическая эффективность определяется отношением надежно переданной информации к потребленной энергии:

$$EE = \frac{\text{Пропускная способность} \left[\frac{\text{бит}}{\text{с}} / \text{ячейка} \right]}{\text{Потребление энергии} [\text{Вт} / \text{ячейка}]}. \quad (3)$$

Полная потребляемая мощность разделяется на эффективную мощность передачи и мощность схемы обработки:

$$P_C = \frac{p}{\mu} + P_{\text{FIX}}. \quad (4)$$

Для фиксированной составляющей потребления P_{FIX} связь между SE и EE задается выражением:

$$EE_0 = \frac{B \log_2(1 + (M - 1)\frac{p}{\sigma^2}\beta_0^0)}{\frac{1}{\mu}p + P_{\text{FIX}}}. \quad (5)$$

Чтобы получить EE при заданной SE_0 , из (2) находится требуемая мощность передачи:

$$p = \frac{(2^{SE_0} - 1)\sigma^2}{(M - 1)\beta_0^0}. \quad (6)$$

После подстановки (6) в (5) получается непосредственная зависимость EE от SE:

$$EE_0 = \frac{BSE_0}{(2^{SE_0} - 1)\frac{v_0}{M - 1} + P_{\text{FIX}}}, \quad (7)$$

где

$$v_0 = \frac{\sigma^2}{\beta_0^0}. \quad (8)$$

По выражению (7) построены кривые на рисунке 1, на котором представлена зависимость энергетической эффективности от спектральной эффективности при различных значениях постоянной схемной мощности (P_{FIX}). Параметр P_{FIX} характеризует энергопотребление аппаратуры, не зависящее от излучаемой мощности сигнала. Случай $P_{\text{FIX}} = 0$ является идеализированным предельным случаем, в котором постоянные аппаратные затраты не учитываются; при этом полная потребляемая мощность не равна нулю и определяется мощностью передающего тракта $\frac{p}{\mu}$. В данном случае ЕЕ монотонно уменьшается с ростом SE. При $P_{\text{FIX}} > 0$, что соответствует практической системе, зависимость ЕЕ(SE) имеет максимум.

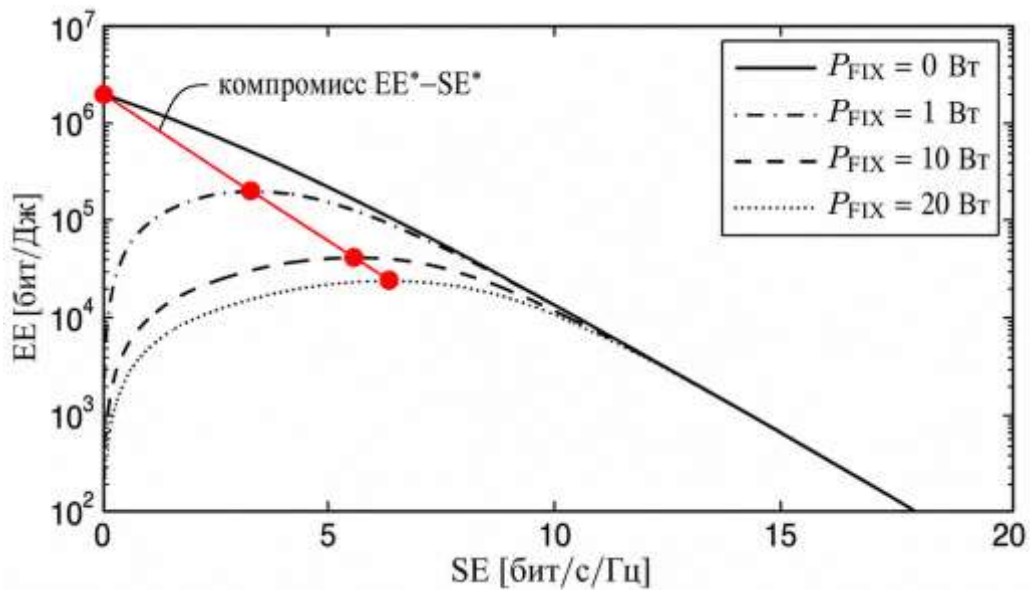


Рисунок 1 – Компромисс между спектральной и энергетической эффективностью при различных значениях P_{FIX}

Рисунок 1 подтверждает расчет по (7): в реальной системе существует оптимальная область SE, после которой дальнейшее увеличение скорости требует непропорционального роста энергозатрат.

Служебная пилотная нагрузка учитывается через длину пилотной последовательности τ_p и длину когерентного блока τ_c . При коэффициенте повторного использования пилотов $f = 1$ в диссертации принято:

$$\tau_p = K, \quad \frac{\tau_p}{\tau_c} = \frac{K}{\tau_c}. \quad (9)$$

Следовательно, увеличение числа одновременно обслуживаемых пользователей K уменьшает долю ресурса, доступного полезным данным, что необходимо учитывать при сравнении ММО-схем по SE.

Вычислительные затраты оценены по мощности схемы CP. Основные численные результаты при $M = 100$ и $K = 10$ приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Мощность вычислительной части CP для схем обработки при $M = 100, K = 10$

Схема	Набор 1, Вт	Набор 2, Вт
M-MMSE	65,48	27,42
S-MMSE	56,35	26,51
RZF	54,43	26,32
ZF	54,43	26,32
MR	53,96	26,27

Из таблицы 1 получаем снижение CP для ZF/RZF относительно M-MMSE:

$$\Delta CP = \frac{65,48 - 54,43}{65,48} \cdot 100 \% \approx 17 \%, \quad (10)$$

$$\Delta CP = \frac{27,42 - 26,32}{27,42} \cdot 100 \% \approx 4 \%. \quad (11)$$

Причина состоит в том, что ZF/RZF обращают матрицы размера $K \times K$, тогда как S-MMSE и M-MMSE используют матрицы размера $M \times M$ и более полный набор статистических данных. RZF и ZF требуют меньшего CP, чем M-MMSE и S-MMSE, потому что инвертируют матрицы размера $K \times K$, а не $M \times M$. При $M = 100$ снижение CP относительно M-MMSE составляет около 17 % для первого набора параметров и около 4 % для второго набора параметров; MR имеет минимальную вычислительную сложность, но уступает по спектральной и энергетической эффективности.

В подразделе 2.3 приведена статистическая оценка помехозащищенности ММО. Приведены аналитические выражения для средней вероятности битовой ошибки в ММО-системах с частотной модуляцией в условиях релеевских замираний, флуктуационного шума, а также преднамеренных помех и ППРЧ. Обобщенная оценка средней вероятности битовой ошибки P_B по K битовым позициям записана как:

$$P_B = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K P_{bi}. \quad (12)$$

Для случая FM-4 при релеевских замираниях получена формула:

$$P_B = \frac{1}{h_0^2 + 1 + \sqrt{h_0^2(h_0^2 + 1)}} = 1 - \sqrt{\frac{h_0^2}{h_0^2 + 1}}. \quad (13)$$

Влияние релейских замираний, флуктуационного шума и преднамеренных помех входит через параметр h_0^2 и его модификации. Расчет по этим зависимостям приводит к кривым на рисунке 2.

Результаты исследования (рисунок 2) показывают, что для обеспечения $P_B = 10^{-4}$ увеличение числа каналов ММО с 1 до 4 дает выигрыш помехозащищенности около 6,5 дБ; увеличение числа частотных подканалов в каждом канале с 1 до 10, 100 и 1000 дает выигрыш около 10, 20 и 30 дБ соответственно.

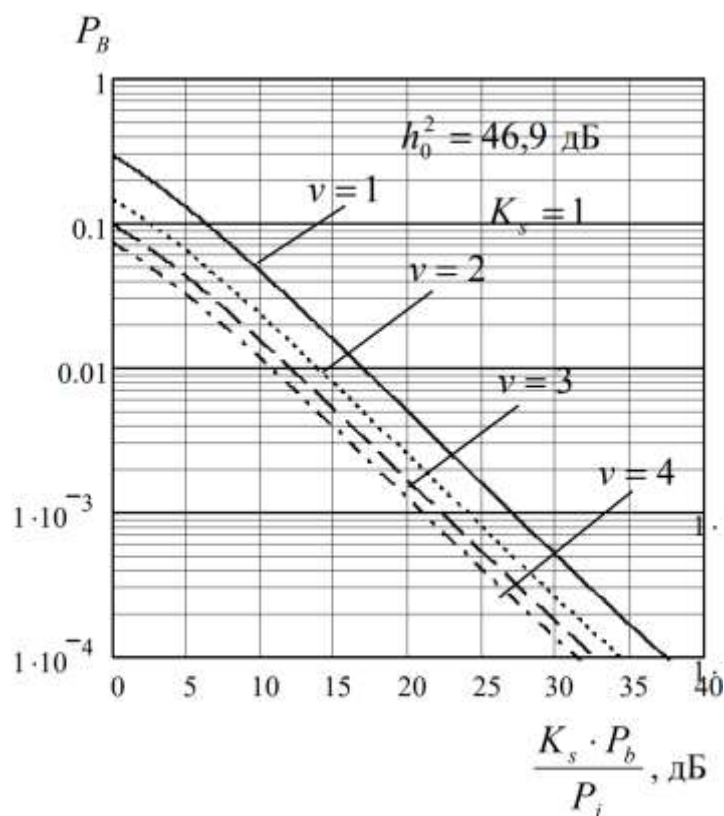


Рисунок 2 – Средняя вероятность битовой ошибки при воздействии на ММО с ФМ-4 ППРЧ для разного количества каналов

Из рисунка 2 следует, что рост числа пространственных каналов изменяет требуемое отношение сигнал/помеха для достижения заданного BER. Поэтому в предложенном методе SE не рассматривается отдельно: допустимым считается только тот прирост скорости, который сохраняет требуемую вероятность ошибки.

В подразделе 2.4 исследован компромисс между энергетической эффективностью и пропускной способностью многосотовой Massive MIMO-системы. Рассмотрены сценарии $K = 10$ и $K = 20$ при изменении числа антенн БС M от 10 до 200 с шагом 10, коэффициент повторного использования пилотов $f = 1$

и длина пилотной последовательности $\tau_p = K$. Сравнение проведено для схем M-MMSE, S-MMSE, RZF, ZF и MR.

Зависимость энергетической эффективности от средней пропускной способности на ячейку при $K = 10$ и первом наборе параметров СР представлена на рисунке 3.

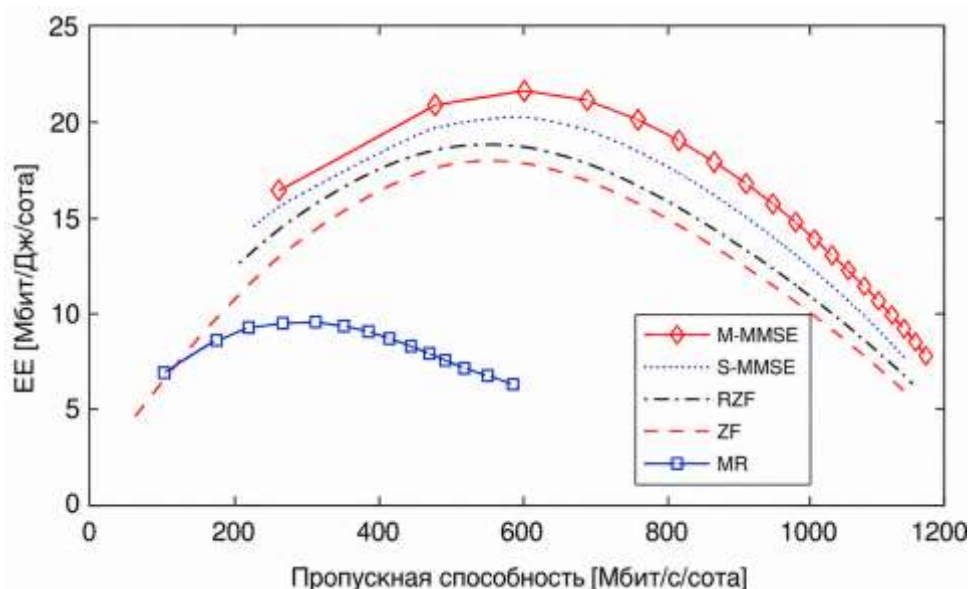


Рисунок 3 – ЕЕ в зависимости от средней пропускной способности на ячейку при $K = 10$ и первом наборе параметров СР

Основные максимальные значения энергетической эффективности и пропускной способности, полученные в подразделе 2.4, приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Максимальные значения ЕЕ и пропускной способности, обобщенные по подразделу 2.4

Схема	Условие	ЕЕ	Пропускная способность
M-MMSE	$K = 10, M = 30$	21,26 Мбит/Дж	600 Мбит/с/ячейка; 9,6 Гбит/с·км ²
M-MMSE	$K = 10, M = 40$	20,73 Мбит/Дж	11 Гбит/с·км ²
RZF/ZF	$K = 10, M = 30$	около 19 Мбит/Дж	8,38 Гбит/с·км ²
MR	$K = 10, M = 40$	10,18 Мбит/Дж	5,07 Гбит/с·км ²
M-MMSE	2-й набор СР	41,52 Мбит/Дж	максимум при $M \approx 30 \dots 40$
S-MMSE	$K = 20, 1\text{-й набор СР}$	22,86 Мбит/Дж	15,05 Гбит/с·км ² при $M = 50$

Итог второго раздела: разработан метод оценки спектральной эффективности MIMO-систем, который объединяет SE, среднюю пропускную способность, пилотную нагрузку, SNR/SINR, BER, ЕЕ, СР и вычислительную сложность. В отличие от первого раздела, где рассматривались обзорные и исходные методы, во втором разделе получены расчетные модели, формулы и количественные результаты для выбора схем обработки в massive MIMO.

В третьем разделе «Разработка алгоритмов повышения спектральной эффективности при использовании технологии MIMO» приведена алгоритмическая и модельно-экспериментальная часть диссертации. Здесь разработаны способы выбора пространственного кодирования для нестационарных частотно-селективных каналов, алгоритм интеграции спектральных методов в MIMO, программно-аппаратная реализация спектральной координации и моделирование помехоустойчивого кодирования. Этот раздел показывает, как предложенные методы работают практически и какой выигрыш дают по пропускной способности и BER.

В подразделе 3.1 разработан метод адаптивного пространственного кодирования сигналов для систем MIMO-OFDM. Установлено, что известные методы STBC, SFBC, WHSTBC-CC и ST-SF — не являются универсальными для каналов связи с одновременно выраженными временной нестационарностью и частотной селективностью. Для STBC входная последовательность элементов сигнального ансамбля d разбивается на два вектора:

$$d^{(1)} = [d_0, \dots, d_{N-1}]^T; \quad d^{(2)} = [d_N, \dots, d_{2N-1}]^T. \quad (14)$$

После передачи через два пространственных канала принятый сигнал описывается выражениями:

$$r_1 = H^{(1)}d^{(1)} + H^{(2)}d^{(2)} + \xi^{(1)}, \quad (15)$$

$$r_2 = -H^{(1)}d^{(2)*} + H^{(2)}d^{(1)*} + \xi^{(2)}. \quad (16)$$

Частотная характеристика каждого антенного канала задается диагональной матрицей:

$$H^{(i)} = \text{diag} [H_0^{(i)} H_1^{(i)} \dots H_k^{(i)}], i \in \overline{1,2}. \quad (17)$$

Для повышения устойчивости к нестационарности используется предварительное преобразование Уолша–Адамара:

$$d^{(W)} = W_N d. \quad (18)$$

Смысл адаптивности заключается в выборе схемы по сочетанию временной нестационарности, частотной селективности и SN. Результат сравнения ASC с STBC, SFBC и ST-SF приведен на рисунке 4.

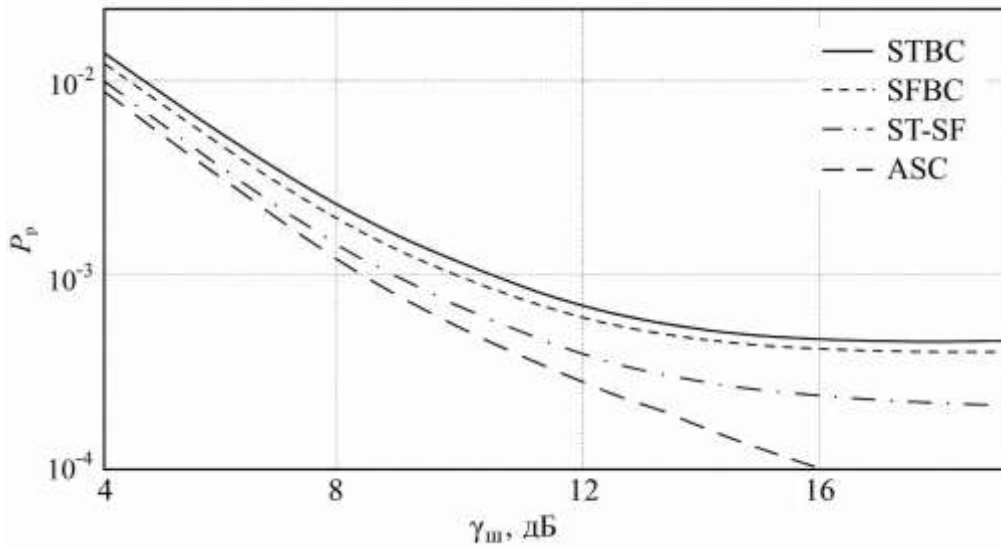


Рисунок 4 – Сравнение устойчивости методов ASC, STBC, SFBC и ST-SF в нестационарном частотно-селективном канале

По результатам моделирования при вероятности ошибки $P_p = 7 \cdot 10^{-3} \dots 3 \cdot 10^{-2}$ метод ASC обеспечивает энергетический выигрыш 2,5...4,0 дБ относительно ST-SF; при $\gamma_{ш} < 10$ дБ выигрыш составляет около 3 дБ. Следовательно, преимуществом ASC является не новая фиксированная кодовая схема, а ситуационный выбор наиболее эффективного известного режима.

В подразделе 3.2 сначала по SNR выбирается размер сигнального ансамбля:

$$M_{\text{mod}} = f(\gamma_{ш}); \text{ QPSK: } 9,4 / 11,2 \text{ дБ при } R = 1/2 / 3/4. \quad (19)$$

Затем вычисляется нормированный доплеровский сдвиг $f_d T$ и временной коэффициент корреляции K_t :

$$K_t = \frac{1}{N^2} \sum_{l=-N+1}^{N-1} (N - |l|) J_0 \left[2\pi f_d T \left(1 + \frac{G}{N} + \frac{l}{N} \right) \right], \quad (20)$$

где G — длина циклического префикса; N — число поднесущих OFDM; $J_0(\cdot)$ — функция Бесселя нулевого порядка. Для частотной корреляции используется параметр $\lambda = e^{\frac{-T}{\tau_{\text{max}}}}$, связанный с максимальной задержкой распространения.

Правила выбора, реализованные алгоритмом, сведены в таблице 3. Текст, формулы образуют единую вычислительную цепочку: оценка $\gamma_{ш} \rightarrow$ расчет $f_d T$, K_t и $K_f \rightarrow$ выбор сигнального ансамбля $\rightarrow$ выбор пространственного кода.

Таблица 3 – Критерии адаптивного выбора пространственного кодирования

Условие канала	Выбираемая схема	Назначение
BPSK / двоичный ансамбль	SF	Максимальное разнесение при сложной селективности
$f_d T \in [0,01; 0,1]$	WHSTBC-CC	Повышение устойчивости нестационарности
$f_d T < 0,01$ и $K_t > K_f$	STBC	Преобладает частотная избирательность при умеренной нестационарности
Большой сигнальный ансамбль / ограничение сложности	SFBC	Снижение трудоемкости реализации

Алгоритм, реализующий эти правила, показан на рисунке 5.

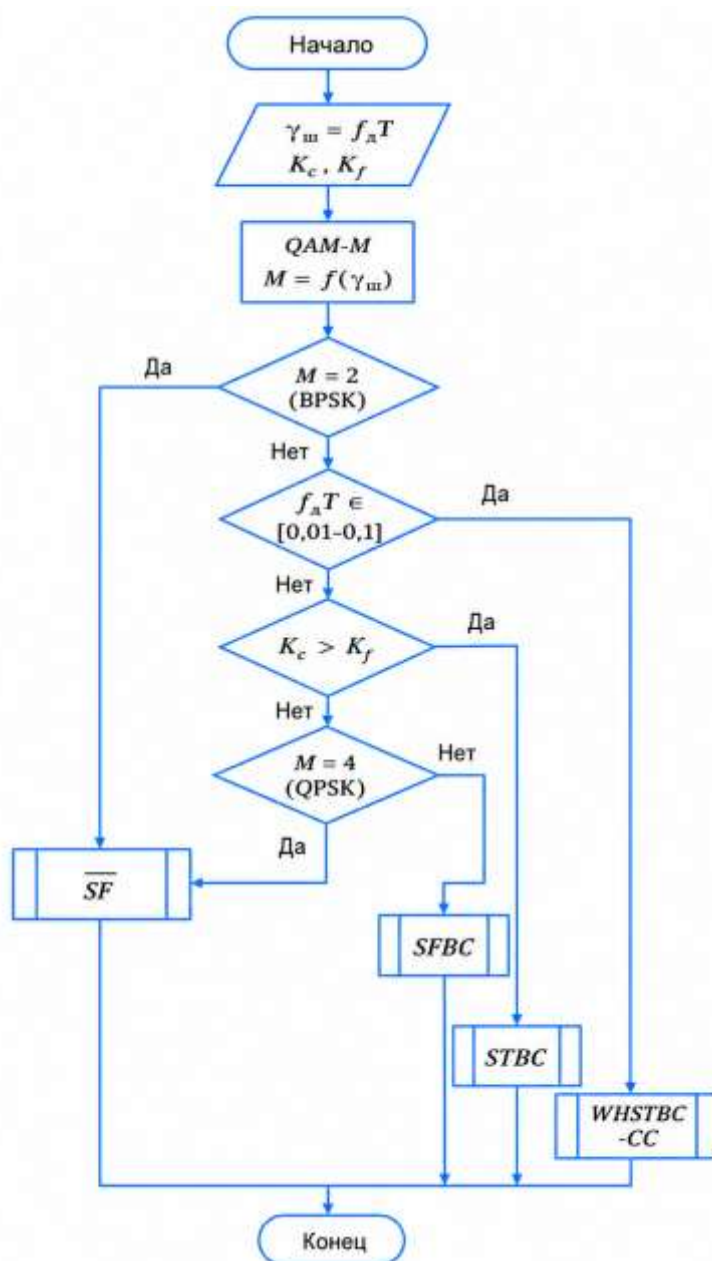


Рисунок 5 – Алгоритм адаптивного пространственного кодирования для MIMO-OFDM

Алгоритмическая новизна заключается в объединении ранее отдельных процедур в одном цикле: оценка канала $\rightarrow$ АМС $\rightarrow$ расчет корреляционных параметров $\rightarrow$ выбор пространственного кода $\rightarrow$ подавление интерференции $\rightarrow$ итоговая проверка SE и BER.

Для пространственно-временной фильтрации базовая оценка комплексных весов определяется корреляционной матрицей помех R и вектором взаимной корреляции p :

$$w = R^{-1}p. \quad (21)$$

Известный алгоритм Уидроу–Хоффа уточняет веса итерационно:

$$w_{k+1} = w_k - \mu \eta_k \xi_k. \quad (22)$$

Отличие нового алгоритма состоит во включении оптимизационной настройки комплексных весов в общий адаптивный контур и в использовании квазиньютоновского подхода/сопряженных градиентов для уменьшения вычислительных затрат при подавлении межканальной интерференции. После пространственной фильтрации выполняется временная фильтрация, уменьшающая влияние шумов, замираний и изменения параметров канала.

В подразделе 3.3 разработанный контур проверяется программно-аппаратно. Структура измерительного комплекса 2×2 MIMO-OFDM V2I с приемопередатчиками AD9361 показана на рисунке 6. В аппаратной части также рассмотрен анализатор спектра на Chipcon CC2500, микросборки MD7105-SY/A7105 и CYWUSB6935, программное обеспечение LCSA и веб-интерфейсы мониторинга. AD9361 / 920 МГц / MIMO-OFDM 2×2 с CC2500 / CYWUSB6935 / 2,4 ГГц / анализатором спектра.

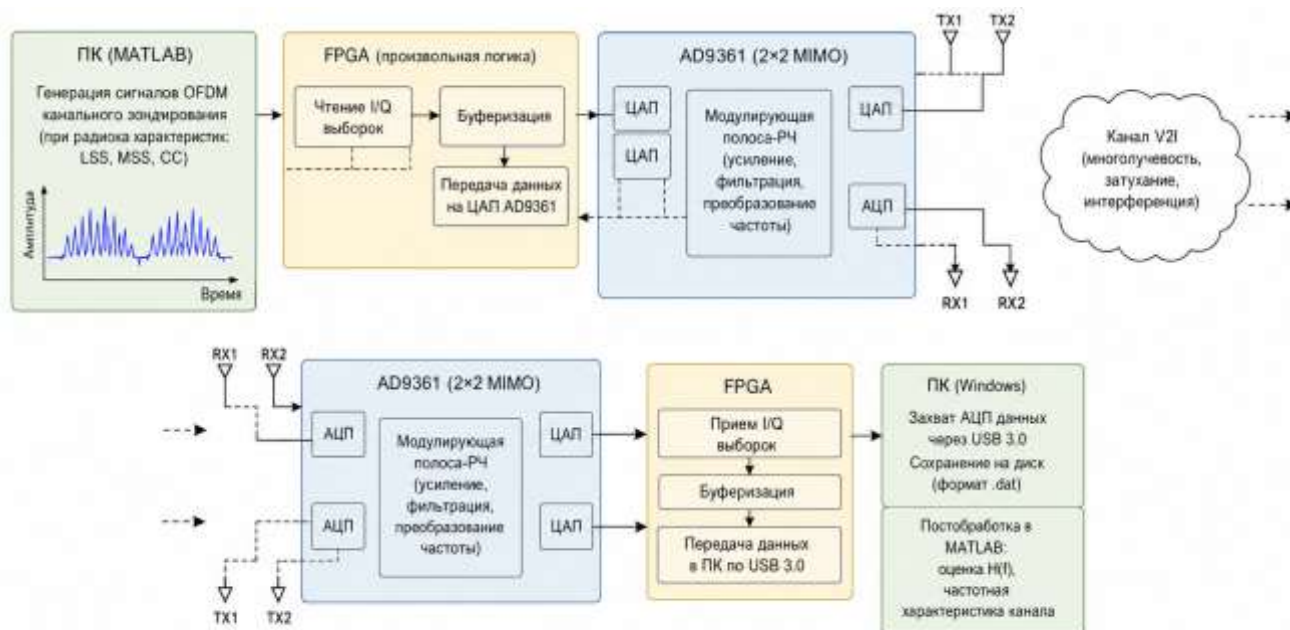


Рисунок 6 – Схема имитационного моделирования и обработки сигнала в системе MIMO-OFDM

По зарегистрированным отсчетам строятся карты пропускной способности по индексам поднесущих и OFDM-символов. Пример такой карты приведен на рисунке 7.

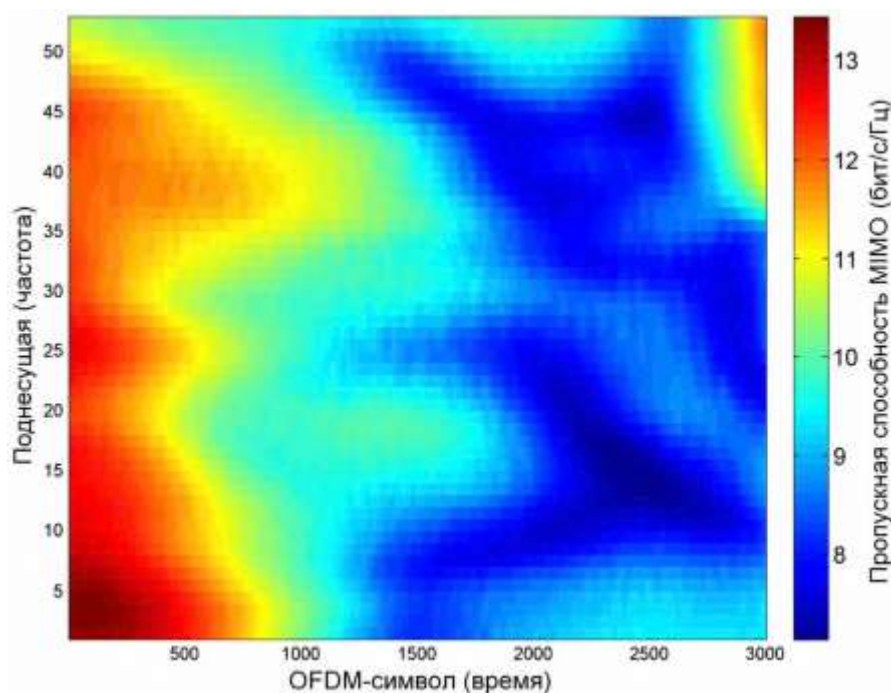


Рисунок 7 – Карта измеренной пропускной способности MIMO-OFDM по поднесущим и OFDM-символам

Из рисунка 7 и экспериментальных данных получено $C_{\max} = 13,37$ бит/(с·Гц) при $D = 76,7$ м для сценария LSS; для MSS получено около 13,0 бит/с/Гц при $D = 13,1$ м. Существенное изменение пропускной способности по времени и частоте подтверждает необходимость адаптивного выбора режима обработки.

В подразделе 3.4 итоговая достоверность проверяется по BER для QPSK со сверточным кодированием и декодированием Витерби. Численные значения сведены в таблице 4, а соответствующие кривые показаны на рисунке 8.

Таблица 4 – BER при жестком и мягком декодировании Витерби

$\frac{E_b}{N_0}$, дБ	Жесткое решение, BER	Мягкое решение, BER
2	$1,0 \cdot 10^{-1}$	$8,0 \cdot 10^{-3}$
3	$2,0 \cdot 10^{-2}$	$3,0 \cdot 10^{-4}$
4	$3,0 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$

При $\frac{E_b}{N_0} = 4$ дБ отношение BER жесткого и мягкого решений составляет:

$$G_{\text{BER}} = \frac{3,0 \cdot 10^{-3}}{1,0 \cdot 10^{-5}} = 300. \quad (23)$$

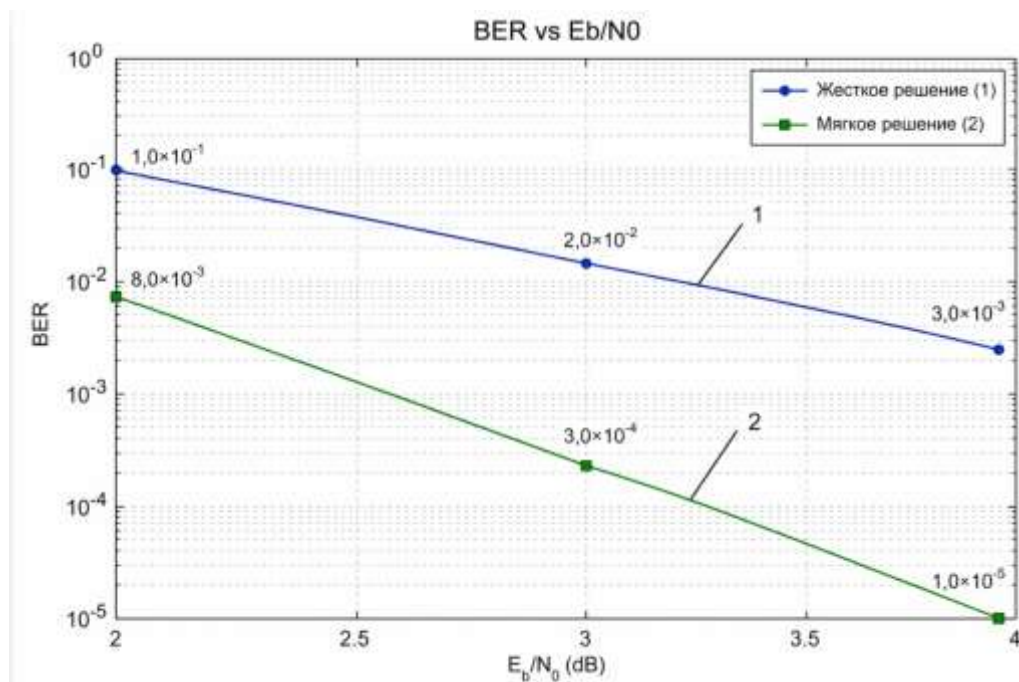


Рисунок 8 – BER при декодировании Витерби с жестким и мягким решением

Таблица 4 и рисунок 8 показывают один и тот же результат: при $\frac{E_b}{N_0} = 4$ дБ мягкое решение снижает BER примерно в 300 раз — с $3 \cdot 10^{-3}$ до $1 \cdot 10^{-5}$. Эта проверка

завершает общую цепочку исследования: рост SE принимается как полезный только при сохранении требуемой достоверности.

Таким образом, в третьем разделе разработаны и проверены алгоритмы повышения спектральной эффективности при MIMO, включая адаптивное пространственное кодирование, интеграцию спектральных методов в архитектуру MIMO, программно-аппаратную реализацию спектральной координации и имитационное моделирование помехоустойчивого кодирования. Главный результат раздела состоит в том, что адаптивный выбор кодирования и обработки позволяет повысить полезную пропускную способность и снизить BER без расширения полосы частот.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведён анализ существующих методов обработки сигналов в MIMO-системах. Установлено, что методы STBC, SFBC и ST-SF эффективны только в ограниченных диапазонах нестационарности и частотной избирательности канала и не обеспечивают устойчивой работы при их одновременном проявлении.

2. Разработан метод многокритериальной оценки спектральной эффективности MIMO-систем, учитывающий полезную пропускную способность, пилотную нагрузку, SNR/SINR, BER, энергетическую эффективность и вычислительную сложность.

3. Усовершенствован метод адаптивного пространственного кодирования ASC и разработан алгоритм ситуационного выбора режимов SFBC, STBC, WHSTBC-CC и SF. По сравнению с методом ST-SF получен энергетический выигрыш 2,5–4,0 дБ при вероятности ошибки $P_p = 7 \cdot 10^{-3} \dots 3 \cdot 10^{-2}$.

4. Разработан метод формирования комплексных весовых коэффициентов антенных каналов в составе адаптивной пространственно-временной обработки MIMO-сигналов, предусматривающий оценку текущей сигнально-помеховой обстановки, адаптивную настройку весов пространственного фильтра по известному критерию минимизации выходной мощности помехи и последующую временную фильтрацию остаточной составляющей ошибки. Усовершенствован способ компенсации ошибок за счёт последовательного применения пространственной и временной фильтрации.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

Статьи в научных изданиях, входящих в перечень ВАК

1. Нгием В.Д. Методы пространственно-временного кодирования сигналов в нестационарных частотно-селективных каналах MIMO-OFDM систем связи // Труды учебных заведений связи. 2026. Т. 12. № 1. С. 69–80.
2. Нгием В.Д., Дворкович А.В. Энергетическая эффективность в многосотовых massive MIMO: влияние схем обработки и параметров аппаратной реализации // Труды учебных заведений связи. 2026. Т. 12. № 2. С. 45–52.

Статьи в изданиях, индексируемых в международной базе данных Scopus

3. N. V. Dong. Study of Error Resilience Efficiency of Viterbi Convolutional Coding Combined with STBC in MIMO Systems // 2025 9th International Conference on Information, Control, and Communication Technologies (ICCT). 2025. P. 1–5.

Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ

4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026664764 Российская Федерация. Программа для расчета спектральной и энергетической эффективности / Нгием В.Д. Автор и правообладатель. № 2026662163; заявл. 21.04.2026; опубл. 18.05.2026.

Прочие публикации

5. Нгием В.Д. Исследование эффективности помехоустойчивости комбинации сверточного кодирования Витерби с STBC для систем MIMO // IX Международная конференция «Информационные технологии и технические средства управления» (ICST-2025), Гомель, Республика Беларусь, 2025 г. — С. 179-181.
6. Нгием В.Д. Адаптивное распределение мощности и выбор матриц предварительного кодирования в многопользовательских системах Massive MIMO с учетом корреляции каналов и аппаратных искажений. // IX Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем» (РАДИОИНФОКОМ-2025), Москва, 2025 г. — С.168-171.