

На правах рукописи

***СТЕПАНОВА АНАСТАСИЯ ГЕОРГИЕВНА***

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ИТЕРАЦИОННЫХ  
АЛГОРИТМОВ ДЕМОДУЛЯЦИИ В СИСТЕМАХ БЕСПРОВОДНОЙ  
СВЯЗИ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЮ МІМО С БОЛЬШИМ  
ЧИСЛОМ АНТЕНН**

Специальность 2.2.15 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

МОСКВА - 2023

Работа выполнена в ордена Трудового Красного Знамени федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский технический университет связи и информатики» (МТУСИ).

Научный руководитель: Панкратов Денис Юрьевич – кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты: Хоров Евгений Михайлович – доктор технических наук, руководитель лаборатории беспроводных сетей Института проблем передачи информации имени А.А. Харкевича РАН

Евсеев Виктор Валерьевич – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник 23 отдела научно-исследовательского центра (проблем применения, обеспечения и управления авиацией ВВС) Федерального государственного казённого военного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем передачи информации имени А.А. Харкевича Российской академии наук

Защита состоится «31» января 2024 г. в 13 часов 00 минут на заседании диссертационного совета по защите докторских и кандидатских диссертаций 55.2.002.01 при МТУСИ по адресу: 111024, Москва, ул. Авиамоторная, д. 8а, ауд. А-211.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте МТУСИ: (<http://srd-mtuci.ru/images/Dis-Stepanova/dis-Stepanova.pdf>).

Автореферат разослан « \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2023 г.

Учёный секретарь диссертационного совета 55.2.002.01, д.т.н, доцент

Терешонок Максим Валерьевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования:** Область исследования настоящей работы соответствует пункту 15 паспорта специальности 2.2.15 «Системы, сети и устройства телекоммуникаций».

Для увеличения пропускной способности в современных системах беспроводной связи 5-го и 6-го поколений (5G и 6G) используется технология с большим числом передающих и приемных антенн (Multiple Input Multiple Output, MIMO). Эта технология, в которой используются несколько десятков антенн, также известна, как Massive MIMO. В системах Massive MIMO будут использоваться десятки (сотни) антенн. Например, технический отчет по исследованию сценариев и требований к технологиям доступа следующего поколения 3GPP TR 38.913 релиз 16 предусматривает использование до 256 антенн на базовой станции и до 32 антенн на абонентской станции.

Технология Massive MIMO позволяет получить высокую спектральную эффективность и высокую энергетическую эффективность беспроводных систем связи, однако для реализации на практике нужны высокоэффективные алгоритмы цифровой обработки сигналов, которые не требуют применения дополнительных ресурсов.

Системы беспроводной связи имеют устойчивую тенденцию усложнения за счет увеличения не только числа антенн, но и кратности модуляции информационных символов, в результате чего, на пути к широкому внедрению технологии Massive MIMO, возникают сложности, в частности, острая потребность в алгоритмах демодуляции, обладающих высокой помехоустойчивостью и приемлемой вычислительной сложностью.

В условиях жесткой конкуренции на рынке услуг связи, а также в условиях импортозамещения оборудования, интерес к дешевым, эффективным и простым демодуляторам резко возрастает.

Актуальной задачей является разработка алгоритмов демодуляции, имеющих помехоустойчивость более высокую, чем у лучшего из линейных алгоритмов – демодулятора оптимального по критерию минимума среднеквадратической ошибки (Minimum Mean Square Error, MMSE) и имеющих такой же порядок сложности.

**Степень разработанности темы.** Огромный вклад в область исследования, разработки и развития технологии MIMO, повышения эффективности и снижения вычислительной сложности алгоритмов многопользовательского приема и цифровой обработки сигналов внесли российские ученые, в том числе: Аджемов А.С., Афанасьев В.П., Бакулин М.Г., Быховский М.А., Волчков В.П., Джиган В.И., Крейнделин В.Б., Пестряков А.В., Флакман А.Г., Хоров Е.М., Шинаков Ю.С., Шлома А.М. и другие. Также эта тематика находится в центре научных интересов зарубежных специалистов, и получила свое отражение в трудах многих исследователей: Foschini G.J., Gans M.J., Alex Grant, Huang G., Leibo Liu,

Guiqiang Peng, Poor H.V., Gregory Raleigh, Cristian Schlegel, Telatar E., Verdu S., Wang X.

По сравнению с обычной системой ММО в Massive ММО, с одной стороны, отмечается существенное преимущество в способности обеспечить более высокий выигрыш от мультиплексирования и разнесения, а с другой стороны, происходит усложнение процесса демодуляции сигналов. Поэтому исследования в области разработки демодуляторов с низкой сложностью и хорошим качеством по помехоустойчивости требуют особого внимания и представляют огромный интерес в настоящее время.

Последние научные исследования раскрывают еще одну проблему современных алгоритмов демодуляции в восходящей линии связи, заключающуюся в ограничении эксплуатационной пригодности алгоритма только в условиях, когда суммарное число передающих антенн абонентских станций намного меньше числа приемных антенн на базовой станции, а это означает сокращение числа возможных пользователей и приводит к значительному снижению эффективности использования ресурсов. Также было доказано, что задача демодуляции в системах Massive ММО имеет вычислительную сложность, возрастающую с увеличением числа антенн, которая быстро становится чрезмерной, что создает серьезные трудности на пути к использованию на практике.

**Цель работы.** Целью работы является разработка итерационных алгоритмов демодуляции в системах беспроводной связи, использующих технологию ММО с большим числом антенн, вычислительная сложность которых имеет тот же порядок, что и у алгоритма MMSE, при этом характеристики помехоустойчивости лучше, чем у алгоритма MMSE.

В диссертации исследуется демодуляция сигналов в системах Massive ММО с применением различных порядков квадратурной амплитудной модуляции (Quadrature Amplitude Modulation, QAM), в том числе очень высокого порядка.

**Решаемые задачи.** Для достижения поставленной цели в настоящей работе решаются следующие задачи.

1. Анализ характеристик помехоустойчивости и вычислительной сложности известных алгоритмов демодуляции систем ММО при использовании QAM-модуляции различных порядков. Выбор наиболее перспективного для исследования итерационного метода, имеющего лучшую скорость сходимости и удобную реализацию на практике.
2. Разработка нелинейного итерационного алгоритма демодуляции для систем Massive ММО, обладающего преимуществом перед алгоритмом MMSE в помехоустойчивости и сложности. Проверка эффективности нового алгоритма при разных порядках QAM-модуляции.
3. Проверка возможности использования негауссовской аппроксимации априорного распределения для улучшения характеристик

помехоустойчивости алгоритмов демодуляции в системах Massive MIMO с высоким порядком модуляции без необходимости перебора комбинаций информационных символов.

4. Оценка возможности практической реализации новых алгоритмов демодуляции в системах Massive MIMO с различной кратностью модуляции. Выявление преимуществ использования новых алгоритмов демодуляции в системах Massive MIMO как по сложности, так и по эффективности.

#### **Научная новизна.**

1. Разработан нелинейный итерационный алгоритм демодуляции для систем MIMO с большим числом антенн на основе метода Чебышева с оценками собственных значений характеристики помехоустойчивости которого лучше, чем у алгоритма MMSE при том же порядке вычислительной сложности.
2. Впервые для демодуляции в системах Massive MIMO предложено использование семейства распределений с негауссовской аппроксимацией априорного распределения информационных символов, в котором гауссовское распределение и равномерное распределение являются крайними частными случаями. Использование этого семейства распределений позволяет синтезировать нелинейные алгоритмы демодуляции с характеристиками помехоустойчивости лучшими, чем у алгоритма MMSE, при сохранении такого же порядка сложности.
3. Разработан новый алгоритм демодуляции для систем Massive MIMO с высокой кратностью QAM модуляции с применением негауссовской аппроксимации априорного распределения передаваемых информационных символов и модифицированного метода Ньютона, обладающий лучшими характеристиками помехоустойчивости по сравнению с алгоритмом MMSE при том же порядке сложности.

#### **Теоретическая и практическая значимость работы.**

1. Показана эффективность учета априорной информации о передаваемом сигнале в виде нелинейной функции в алгоритмах демодуляции для систем Massive MIMO на основе метода Чебышева.
2. Доказано, что при использовании предложенной негауссовской аппроксимации априорного распределения в виде семейства распределений, в котором гауссовское распределение и равномерное распределение являются крайними частными случаями, вычисление оценок максимума апостериорной плотности вероятности (Maximum A posterior Probability, MAP) сводится к системе нелинейных (степенных)

уравнений, которая может быть решена с помощью методов, имеющих полиномиальную сложность.

3. Установлено, что использование новой негауссовской аппроксимации априорного распределения в системах Massive MIMO с высоким порядком модуляции позволяет получить алгоритмы демодуляции без необходимости перебора комбинаций информационных символов с более высокой помехоустойчивостью, чем у алгоритма MMSE.
4. Разработан новый нелинейный итерационный алгоритм демодуляции на основе метода Чебышева с оценками собственных значений для систем беспроводной связи, использующих технологию MIMO с большим числом антенн, который обладает лучшими характеристиками помехоустойчивости и обеспечивает энергетический выигрыш порядка 1,5 – 2,3 дБ при меньшей или примерно той же сложности, что и алгоритм MMSE.
5. На основе предложенной негауссовской аппроксимации априорного распределения с использованием модифицированного метода Ньютона разработан новый алгоритм демодуляции, характеристики помехоустойчивости, которого улучшаются при увеличении числа антенн и кратности модуляции при сохранении приемлемой вычислительной сложности (порядок сложности алгоритма MMSE), что позволяет использовать его в системах Massive MIMO.

#### **Использование и внедрение результатов работы.**

Результаты диссертационной работы использованы при разработке алгоритмов демодуляции в системах MIMO с большим числом антенн.

Практическую ценность полученных результатов подтверждают соответствующие документы.

#### **Методология и методы исследования**

Основные результаты были получены на базе использования методов статистической радиотехники, теории связи, теории численных методов, теории вероятностей и математической статистики, теории вычислительной сложности алгоритмов и имитационного компьютерного моделирования.

Для исследования в работе используется следующий математический аппарат: теория оценивания, теория связи, теория оптимизации, теория численных методов, линейная алгебра и теория матриц, теория вероятностей и математическая статистика, теория статистического синтеза и теория вычислительной сложности алгоритмов.

#### **Положения, выносимые на защиту.**

1. Предложен новый нелинейный итерационный алгоритм типа Чебышева, позволяющий получить выигрыш в помехоустойчивости порядка 2,3 дБ на уровне  $FER = 0,01$  по сравнению с алгоритмом MMSE

при том же порядке сложности в системе MIMO с конфигурацией  $64 \times 64$  и модуляцией 16QAM.

2. Доказано, что использование новой негауссовской аппроксимации априорного распределения в системах Massive MIMO с высоким порядком модуляции позволяет синтезировать алгоритмы демодуляции, обеспечивающие выигрыш в помехоустойчивости порядка 1-6 дБ по сравнению с алгоритмом MMSE без увеличения порядка сложности.
3. Установлено, что использование предложенной негауссовской аппроксимации априорного распределения совместно с модифицированным методом Ньютона для систем Massive MIMO с кратностью модуляции 256QAM и выше позволяет обеспечить выигрыш в помехоустойчивости примерно 6 дБ при увеличении сложности обработки на 17% (в 1,17 раза) по сравнению с алгоритмом MMSE.

**Личный вклад.** Личный вклад автора заключается в разработке алгоритмов демодуляции, анализе их эффективности и вычислительной сложности, обобщении полученных результатов и формулировке выводов.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Основные результаты диссертационной работы обсуждались на следующих научных конференциях: Международная научно-техническая конференция «Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения» (INTERMATIC), 2017г., 2018г.; Международная научно-техническая конференция «Телекоммуникационные и вычислительные системы – 2018», 1-я и 2-я Всероссийская конференция «Современные технологии обработки сигналов» 2018г., 2019г.; Международная отраслевая научно-техническая конференция «Технологии информационного общества» 2018г., 2019г.; Международная конференция «Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий - РЭУС-2020»; «24th Conference of Open Innovations Association (FRUCT)» 2019г.; Proceedings of the International Conference «Technology & Entrepreneurship in Digital Society (TEDS)» 2019г.; Международная конференция «Волновая электроника и ее применение в информационных и телекоммуникационных системах» («Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems, WECONF») 2018г., 2021г.; «Systems of Signal Synchronization Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO)» 2020г.; Международная научно-техническая конференция «Systems of signals generating and processing in the field of on board communications», 2022 г.

**Публикации.** Основные положения диссертации опубликованы в ведущих рецензируемых научно-технических журналах, входящих в Перечень ВАК Минобрнауки России 4 работы, индексируемых в международной базе данных Scopus 9 работ, в материалах международных конференций 14 работ, из них 5 Scopus, в изданиях, индексируемых в международной базе данных Web of Science

6 работ. Выпущено учебно-методическое пособие «Моделирование системы радиосвязи с разным числом передающих антенн».

Всего опубликовано 25 работ.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы, а также приложения. Общий объем диссертации составляет 163 страницы. Материал диссертации иллюстрируется 43 рисунками и 17 таблицами. Список литературы содержит 153 наименования.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель и основные направления исследований, приведен краткий обзор существующих и предлагаемых методов решения поставленных задач.

В **первом разделе** дано краткое описание ключевых принципов технологии MIMO и Massive MIMO. Проведен сравнительный анализ помехоустойчивости известных алгоритмов демодуляции в системах MIMO различных конфигураций. Показано, что существует острая необходимость в разработке новых алгоритмов демодуляции с хорошими характеристиками помехоустойчивости и приемлемой вычислительной сложностью с целью практической реализации в системах Massive MIMO.

На рисунке 1 изображена структурная схема системы Massive MIMO. В общем случае имеется  $l$ ,  $l=1,2,\dots,t$  пользователей с  $m_l$  передающими антеннами (число антенн у пользователей может быть как одинаковым, так и разным), общее

число передающих антенн  $M = \sum_{l=1}^t m_l$ . Базовая станция имеет блок демодулятора

Massive MIMO с  $N$  приемными антеннами, причем  $N \geq M$ . В блоке MIMO демодуляции осуществляется одновременное оценивание принятых от всех пользователей QAM символов. После этого происходит группировка полученных оценок по абонентам для дальнейшей QAM демодуляции с получением потоков кодированных битов и окончательного их декодирования. Различные пространственно мультиплексируемые потоки различных абонентов обрабатываются одним потоком на базовой станции.

Модель сигнала, который поступает на вход демодулятора Massive MIMO (блок оценивания QAM символов) в такой системе, имеет вид:

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \boldsymbol{\eta}, \quad (0)$$

где  $\mathbf{y}$  - комплексный вектор принимаемых сигналов размерности  $N \times 1$ ;  $\mathbf{H}$  - комплексная матрица радиоканала MIMO размерности  $N \times M$ ;  $\mathbf{x} = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_M]^T$  - вектор переданных комплексных информационных символов размерности  $M \times 1$ ;  $\boldsymbol{\eta}$  - комплексный гауссовский случайный вектор шума



размерности  $N \times 1$  с нулевым математическим ожиданием и корреляционной матрицей  $\mathbf{R}_\eta = D_\eta \mathbf{I}_N$ ;  $D_\eta = 2\sigma_\eta^2 = E\{\eta_n \eta_n^*\}$  - дисперсия комплексного отсчёта шума наблюдения;  $n=1, \dots, N$ ;  $\mathbf{I}_N$  - единичная матрица размера  $N \times N$ . Элементы  $h_{ij}$  матрицы  $\mathbf{H}$  радиоканала MIMO являются комплексными гауссовскими случайными величинами и представляют собой комплексные коэффициенты передачи от  $j$ -й передающей антенны к  $i$ -й приемной антенне.

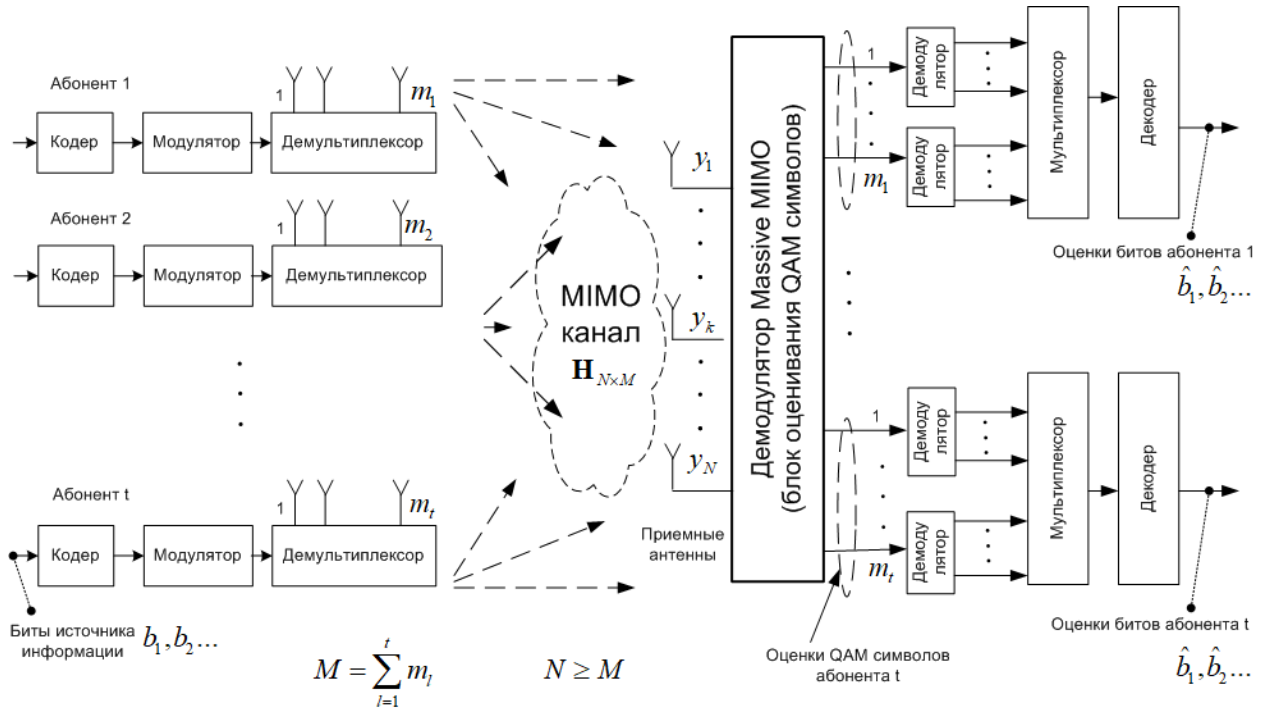


Рисунок 1– Структурная схема системы Massive MIMO

Объект исследования настоящей работы — это блок оценивания QAM-символов в системах с MIMO-каналом (Демодулятор Massive MIMO), что соответствует пункту 15 паспорта специальности 2.2.15 «Системы, сети и устройства телекоммуникаций».

В настоящее время для восстановления передаваемого сигнала на приёмной стороне в системах MIMO при демодуляции используются различные алгоритмы обработки сигналов.

Алгоритм демодуляции, оптимальный по критерию максимального правдоподобия (ML), описывается следующим выражением:

$$\hat{\mathbf{x}}^{ML} = \arg \min_{\mathbf{x} \in \mathcal{S}} \|\mathbf{y} - \mathbf{H}\mathbf{x}\|^2. \quad (9)$$

Оценка ML минимизирует квадрат нормы невязки, что соответствует нахождению максимума функции правдоподобия  $p(\mathbf{y} | \mathbf{x})$  и наилучшему результату в помехоустойчивости. Увеличение числа антенн для ML сопряжено с серьезным усложнением, например, для 16QAM при конфигурации  $4 \times 4$  приходится вычислить  $16^4 = 65536$  норм, а для конфигурации  $16 \times 16$  при 64QAM уже потребуется считать  $64^{16} = 7,9 \cdot 10^{28}$  норм, вычисления необходимо выполнить

за промежутки времени равной длительности информационного символа, поэтому алгоритм ML для систем Massive MIMO становится нереализуем.

В декорреляторе (алгоритм Zero Forcing, ZF) оценка ZF находится по следующей формуле:

$$\hat{\mathbf{x}}^{ZF} = \arg \min_{\mathbf{x} \in C^I} \|\mathbf{y} - \mathbf{H}\mathbf{x}\|^2 = (\mathbf{H}'\mathbf{H})^{-1}\mathbf{H}'\mathbf{y}, \quad (0)$$

где  $C^I$  -  $I$ -мерное непрерывное комплексное пространство;  $\hat{\mathbf{x}}$  - оценки принятого вектора информационных символов;  $\mathbf{y}$  - вектор принимаемых сигналов размерности  $N \times 1$ ;  $\mathbf{H}$  - комплексная матрица радиоканала MIMO размерности  $N \times M$ ;  $(\mathbf{H}'\mathbf{H})^{-1}\mathbf{H}'$  - псевдообратная матрица по отношению к матрице канала  $\mathbf{H}$ ;  $\mathbf{H}'$  - эрмитово сопряженная матрица по отношению к матрице канала  $\mathbf{H}$ .

В данном случае поиск минимума квадрата нормы находится по непрерывному комплексному пространству, что сильно снижает вычислительную сложность алгоритма по сравнению с алгоритмом ML. В алгоритме ZF не учитывается наличие шума наблюдения, что значительно ухудшает характеристики помехоустойчивости.

Алгоритм, оптимальный по критерию минимума среднеквадратической ошибки (MMSE). Оценка  $\hat{\mathbf{x}}^{MMSE}$  находится из соотношения:

$$\hat{\mathbf{x}}^{MMSE} = (\mathbf{H}'\mathbf{H} + 2\sigma_n^2 \cdot \mathbf{1})^{-1}\mathbf{H}'\mathbf{y} = (\mathbf{T}^{MMSE})^{-1}\mathbf{v}, \quad (0)$$

где  $2\sigma_n^2$  - дисперсия шума на входе каждой приемной антенны;  $\mathbf{1}$  - единичная матрица;  $\mathbf{T}^{MMSE} = \mathbf{H}'\mathbf{H} + 2\sigma_n^2 \cdot \mathbf{1}$  представляет собой эрмитову матрицу размерности  $N \times N$ ;  $\mathbf{v} = \mathbf{H}'\mathbf{y}$  - вектор-столбец преобразованных наблюдений размера  $N \times 1$ .

В отличие от ZF в алгоритме MMSE учитывается влияние шума, что дает возможность улучшить характеристики помехоустойчивости, при этом сложность алгоритмов примерно одинаковая. Алгоритм MMSE позволяет получить наилучшую помехоустойчивость приёма сигналов среди всех линейных алгоритмов демодуляции, однако при высоких порядках модуляции сильно уступает помехоустойчивости алгоритма ML.

Квазиоптимальный алгоритм K-best основан на стратегии древовидного поиска минимума квадрата нормы невязки  $\|\mathbf{y} - \mathbf{H}\mathbf{x}\|^2$ , но в отличие от метода максимального правдоподобия поиск осуществляется не по всему множеству комбинаций  $\Theta^I$ , а выбираются  $K$  наилучших комбинаций с наименьшим частичным евклидовым расстоянием (Partial Euclidean Distance, PED).

На рисунке 2 представлен график вероятности ошибки на кадр с использованием кодирования турбокодом со скоростью 1/2 алгоритмов демодуляции ZF, MMSE, K-best (при разных параметрах  $K = 8; 16; 32; 64$ ), ML для системы MIMO с 8 передающими и 8 приемными антеннами в режиме пространственного мультиплексирования, модуляцией QPSK. Здесь и далее характеристики помехоустойчивости показывают зависимость коэффициента

ошибок на кадр (FER, Frame Error Rate) от отношения энергии одного бита и спектральной плотности шума,  $E_b/N_0$  в дБ.

Проигрыш MMSE по сравнению с ML составляет 1,7 дБ при вероятности ошибки на кадр (FER), равной  $10^{-2}$ , кривая помехоустойчивости алгоритма K-best при увеличении K совпадает с кривой ML, при  $K = 64$  достигает оптимальных значений. При  $K = 8$  алгоритм K-best показывает результат, близкий с алгоритмом MMSE. Алгоритм ZF уступает всем алгоритмам.

При высокой кратности модуляции получить характеристики помехоустойчивости алгоритма ML становится очень сложно, поэтому далее используется сравнение с характеристиками алгоритма K-best, которые при большом значении параметра K приближаются к значениям ML.

На рисунке 3 хорошо видно, что в системе MIMO конфигурации  $8 \times 8$  с помехоустойчивым кодированием и модуляцией 64 QAM разница в помехоустойчивости алгоритмов MMSE и K-best (с параметром  $K = 128$ ) составляет уже 14 дБ на уровне FER равной  $10^{-2}$ , т.е. энергетические потери MMSE быстро растут с увеличением кратности модуляции.

Алгоритмы ZF и MMSE обладают сравнительно низкой сложностью реализации, но при этом значительно проигрывают алгоритму ML по точности оценки принятых символов и, в конечном счете, по вероятности ошибочного приема бит.

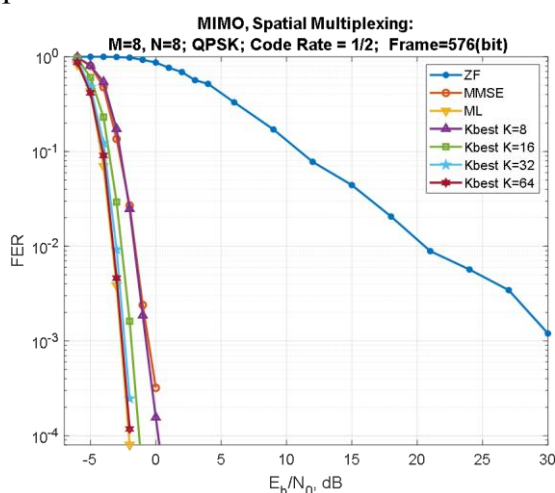


Рисунок 2

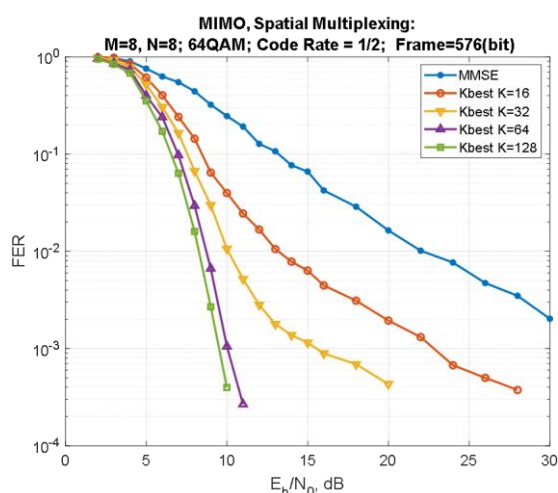


Рисунок 3

Алгоритм K-best может достигать значений помехоустойчивости ML, но с увеличением числа антенн, кратности модуляции и параметра K вычислительная сложность его критически быстро растет. Например, для 16QAM конфигурации  $4 \times 4$  с параметром  $K = 16$  вычислительная сложность будет составлять 60816 операций, для конфигурации  $16 \times 16$  при 64QAM с параметром  $K = 16$  потребуется уже 2163280 элементарных арифметических операций, а при увеличении K до 32 потребуется и вовсе 8323168 операций.

На рисунке 4 показано сравнение алгоритмов MMSE и K-best при разных модуляциях в системе MIMO антенной конфигурации  $8 \times 8$ . По оси абсцисс относительная сложность, выраженная в разгах, по оси ординат выигрыш в

помехоустойчивости, определяемый в дБ. Результаты получены по отношению к соответствующим значениям алгоритма MMSE. Видно, что с увеличением порядка модуляции для алгоритма K-best требуется увеличивать значение параметра  $K$ , что приводит к существенному росту вычислительных затрат.

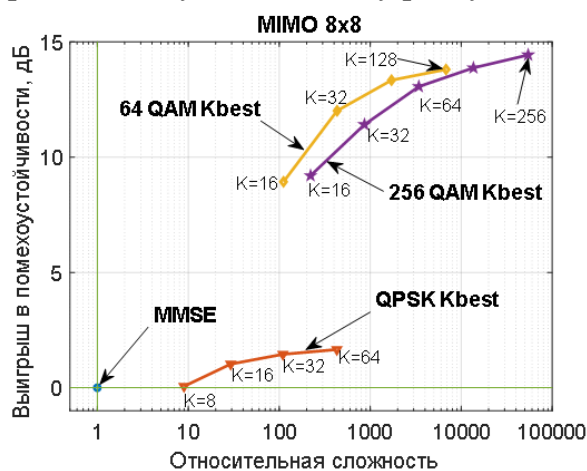


Рисунок 4

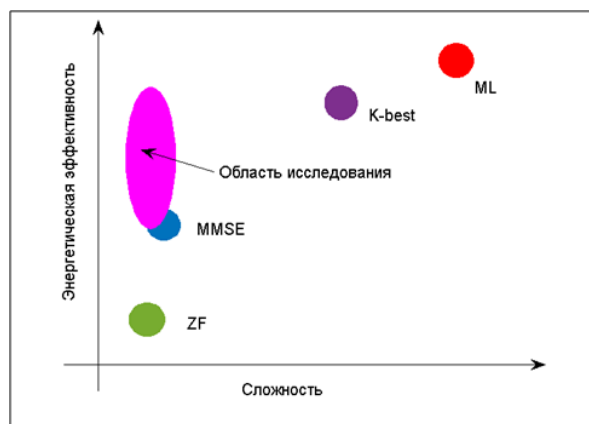


Рисунок 5

Увеличение числа антенн в системе MIMO приводит к трудностям использования существующих алгоритмов демодуляции, проблема усугубляется, когда применяются схемы модуляции высокого порядка и мультиплексируется большое число пользователей. В результате чего неизбежно возникает потребность в разработке новых алгоритмов демодуляции с хорошими характеристиками помехоустойчивости и приемлемой вычислительной сложностью для практической реализации в системах Massive MIMO.

На рисунке 5 отмечена область научного исследования диссертационной работы, т.е. в границах интереса находятся демодуляторы с низкой сложностью и высокой помехоустойчивостью.

Для систем MIMO с большим числом антенн (Massive MIMO), использующих высокий порядок модуляции, остро стоит вопрос синтеза алгоритмов демодуляции, обладающих характеристиками помехоустойчивости лучшими, чем характеристики алгоритма MMSE, и имеющих приемлемую вычислительную сложность (тот же порядок сложности, что и алгоритм MMSE). Настоящая работа посвящена решению этой проблемы.

Во **втором разделе** рассмотрены линейный и нелинейный итерационные алгоритмы демодуляции для систем MIMO с большим числом антенн на основе метода Чебышева с точными и оценками собственных значений матрицы канала.

Для улучшения характеристик линейных итерационных алгоритмов предложено выйти за рамки линейных алгоритмов, в результате чего был разработан нелинейный алгоритм типа Чебышева. Целью добавления нелинейности является улучшение характеристик помехоустойчивости по сравнению с линейным итерационным алгоритмом типа Чебышева или сокращение вычислительной сложности (числа итераций) при сохранении той же помехоустойчивости.

Нелинейный алгоритм демодуляции на основе итерационного метода Чебышева описывается выражением (5) с итерационными параметрами (6):

$$\hat{x}_i = \hat{x}_{i-1} + \tau_{i-1} (\mathbf{v} - (\mathbf{H}'\mathbf{H} + 2\sigma_\eta^2 \cdot \mathbf{1})f(\frac{\hat{x}_{i-1}}{D})), \quad (0)$$

$$\tau_i = \left[ \frac{\gamma_2 - \gamma_1}{2} \cos\left(\frac{i-1/2}{i_{\max} + 1} \pi\right) + \frac{\gamma_2 + \gamma_1}{2} \right]^{-1}, \quad (0)$$

где  $\gamma_1, \gamma_2$  – минимальное и максимальное собственные значения матрицы канала  $\mathbf{H}$ ;  $i_{\max}$  – максимальное число итераций, которое используется в алгоритме типа Чебышева;  $\mathbf{v} = \mathbf{H}'\mathbf{y}$  – вектор преобразованных наблюдений. Его принципиальное отличие от линейного алгоритма Чебышева заключается в наличии нелинейной функции  $f(\hat{\mathbf{x}})$  на каждой итерации. Вид этой нелинейной функции зависит от вида используемой модуляции.

Для сигналов двоичной фазовой модуляции (BPSK)  $x(m) = \pm 1, m = 1, 2$  выражение для нелинейной функции имеет вид:

$$f(\hat{x}) = th\left(\frac{\hat{x}}{\sigma_\xi^2}\right). \quad (0)$$

Для сигналов квадратурной фазовой модуляции (QPSK)  $x(m) = \pm \frac{1}{\sqrt{2}} \pm j \frac{1}{\sqrt{2}}, m = 1, 2, 3, 4$  выражение для нелинейной функции:

$$f(\hat{x}) = \frac{1}{\sqrt{2}} \left( th\left(\frac{\text{Re}(\hat{x})}{\sigma_\xi^2 \sqrt{2}}\right) + j \cdot th\left(\frac{\text{Im}(\hat{x})}{\sigma_\xi^2 \sqrt{2}}\right) \right). \quad (0)$$

Алгоритмы типа Чебышева обеспечивают высокую скорость сходимости, но для определения итерационных параметров необходимо априорное знание собственных значений  $\gamma_2, \gamma_1$  матрицы  $\mathbf{H}$  радиоканала MIMO, что является отдельной сложной задачей. Поэтому в качестве собственных значений предложено использовать их оценки, что вносит лишь небольшую погрешность с незначительным ухудшением характеристик помехоустойчивости. Представленные в диссертации результаты алгоритмов на основе метода Чебышева получены с оценками собственных значений.

На рисунке 6 показаны зависимости порогового значения отношения энергии одного бита и спектральной плотности мощности шума  $E_b/N_0$  при вероятности ошибки на кадр  $FER = 0,01$  (1%) от числа итераций для линейного (Cheb) и нелинейного (ChebNL) алгоритмов типа Чебышева в системе MIMO с конфигурацией  $32 \times 32$  при использовании модуляции 16QAM. Нелинейный алгоритм имеет более высокую скорость сходимости по сравнению с линейным алгоритмом и при меньшем числе итераций может достигать характеристик MMSE алгоритма. Выигрыш по числу итераций составляет примерно 2 раза (для

нелинейного алгоритма 14 итераций против 24 итераций для линейного алгоритма).

На рисунке 7 изображены характеристики помехоустойчивости алгоритмов демодуляции систем MIMO с конфигурацией 64×64, анализ которых показывает, что нелинейный алгоритм типа Чебышева при 24 итерациях обладает преимуществом помехоустойчивости в 2,3 дБ на уровне  $FER = 0,01$  по сравнению с алгоритмом MMSE, а с линейным алгоритмом типа Чебышева – почти 3,2 дБ.

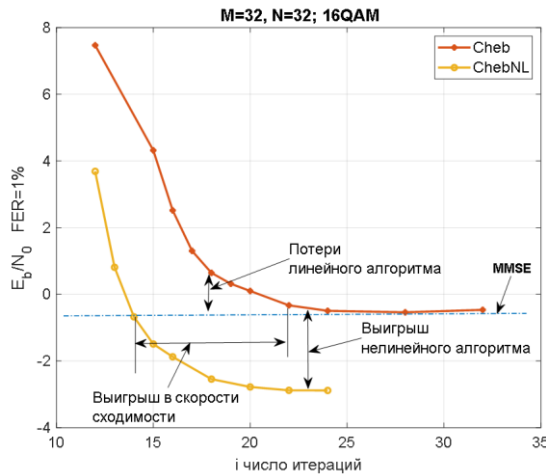


Рисунок 6

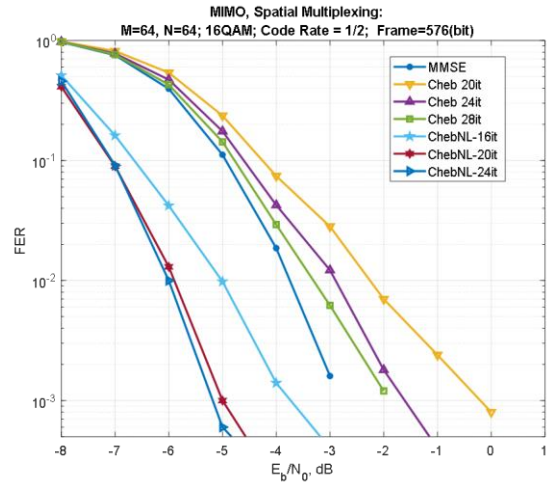


Рисунок 7

Нелинейный алгоритм типа Чебышева обеспечивает характеристики помехоустойчивости лучше, чем линейный алгоритм, и лучше, чем MMSE.

Однако для модуляций высокого порядка нелинейный алгоритм типа Чебышева не так эффективен и хорошо работает при условии, когда число приемных антенн много больше числа передающих антенн (при меньшем числе пользователей). Поэтому в **третьем разделе** предлагаются новые нелинейные алгоритмы демодуляции с негауссовской аппроксимацией априорного распределения для реализации в системах Massive MIMO с большой кратностью модуляции.

В процессе дальнейшего рассмотрения комплексная модель (1) преобразована в действительную:

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \boldsymbol{\eta}, \quad (1)$$

где  $\mathbf{H}$  - матрица радиоканала MIMO размерности  $2N \times 2M$  с действительными коэффициентами;  $\boldsymbol{\eta}$  - вектор действительных гауссовских случайных величин размерности  $2N \times 1$  с нулевым математическим ожиданием и корреляционной матрицей  $\mathbf{R}_{\eta} = \sigma_{\eta}^2 \mathbf{I}_{2N}$ ;  $\mathbf{x} = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_{2M}]^T$  - вектор размерности  $2M \times 1$  оцениваемых действительных квадратурных составляющих комплексного вектора  $\dot{\mathbf{x}}$  модели (0), модулированных с помощью символов квадратурной амплитудной модуляции (QAM). Для случая 1 антенны действительная модель имеет вид:

$$\begin{bmatrix} y_{1,r} \\ y_{1,i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11,r} & -h_{11,i} \\ h_{11,i} & h_{11,r} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_{1,r} \\ x_{1,i} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \eta_{1,r} \\ \eta_{1,i} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где индекс  $r$  означает действительную часть, а индекс  $i$  означает мнимую часть соответствующего комплексного элемента.

Для решения задачи оценивания вектора параметров  $\mathbf{X}$  использовался байесовский подход, предполагающий известной априорную плотность  $p_{pr}(\mathbf{x})$  оцениваемых параметров, которая в свою очередь позволяет определить апостериорную плотность  $p_{ps}(\mathbf{x}|\mathbf{y})$  по формуле Байеса:

$$p_{ps}(\mathbf{x}|\mathbf{y}) = \frac{L(\mathbf{y}|\mathbf{x})p_{pr}(\mathbf{x})}{p(\mathbf{y})}, \quad (3)$$

где  $L(\mathbf{y}|\mathbf{x})$  - функция правдоподобия, которая согласно модели (1) описывается гауссовской плотностью формулой:

$$L(\mathbf{y}|\mathbf{x}) = \frac{1}{(2\pi\sigma_\eta^2)^N} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma_\eta^2}(\mathbf{y} - \mathbf{H}\mathbf{x})^T(\mathbf{y} - \mathbf{H}\mathbf{x})\right). \quad (4)$$

Оценка вектора  $\mathbf{X}$  находилась из условия максимума апостериорной плотности вероятности (МАР)  $\hat{\mathbf{x}} = \arg \max_{\mathbf{x} \in \Omega_{\mathbf{x}}} p(\mathbf{x}|\mathbf{y})$ ,

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{x}}_{MAP} &= \arg \max (L(\mathbf{y}|\mathbf{x})p_{pr}(\mathbf{x})) = \\ &= \arg \max (\log(L(\mathbf{y}|\mathbf{x})) + \log(p_{pr}(\mathbf{x}))) \end{aligned} \quad (5)$$

Поскольку символы являются функциями разных случайных параметров, иначе говоря, они функционально независимы, то полагалось, что вектор  $\mathbf{x}$  имеет негауссовское априорное распределение:

$$p_{pr}(\mathbf{x}) = \prod_{m=1}^{2M} p_{pr}(x_m). \quad (6)$$

Как показано в диссертации, при негауссовском априорном распределении (6) МАР оценки квадратурных составляющих переданных QAM-символов представляют собой решение нелинейного уравнения:

$$-\frac{1}{\sigma_\eta^2} \mathbf{H}^T \mathbf{H} \hat{\mathbf{x}}_{MAP} + \frac{1}{\sigma_\eta^2} \mathbf{H}^T \mathbf{y} + \frac{\mathbf{d}}{\mathbf{d}\hat{\mathbf{x}}_{MAP}} \left( \sum_{m=1}^{2M} \log(p_{pr}(\hat{x}_{MAP,m})) \right) = 0, \quad (7)$$

где  $\frac{\mathbf{d}}{\mathbf{d}\mathbf{x}} f(\mathbf{x})$  – производная от скалярной функции  $f(\mathbf{x})$  векторного аргумента  $\mathbf{x}$  по векторному аргументу  $\mathbf{x}$ . Эта производная является векторной функцией.

Равномерное распределение в большей степени учитывает свойства истинного априорного распределения и может достаточно хорошо аппроксимировать распределение дискретной случайной величины, особенно при высоком порядке QAM-модуляции. Однако из-за не дифференцируемости, использовать его для оптимизации и решения уравнения (7) затруднительно.

Поэтому была предложена аппроксимация в виде обобщённого семейства распределений:

$$p_{pr}(x) = \frac{ie^{-\frac{x^{2i}}{(2d^2)^i}}}{\sqrt{2d}\Gamma\left(\frac{1}{2i}\right)}, \quad (8)$$

где  $i, d$  – параметры распределения,  $\Gamma(\square)$  – Гамма-функция.

Предлагаемое семейство распределений удобно своей простотой и обладает рядом преимуществ: оно дифференцируется, при этом гауссовское и равномерное распределения являются его частными случаями.

Вид предложенного распределения (8) при разных значениях параметра  $i$  показан на рисунке 8, где хорошо видно, что уже при  $i = 32$  распределение на заданном интервале стремится к равномерному, а при  $i = 1$  является гауссовским.

В случае использования априорного распределения (8) MAP-оценками вектора  $\mathbf{X}$  являются решения системы нелинейных уравнений:

$$-\frac{1}{\sigma_\eta^2} \mathbf{H}^T \mathbf{H} \hat{\mathbf{x}}_{MAP} + \frac{1}{\sigma_\eta^2} \mathbf{H}^T \mathbf{y} - \frac{2i}{(2d^2)^i} [\hat{\mathbf{x}}_{MAP}]^{2i-1} = 0, \quad (8)$$

где оператор  $[\mathbf{z}]^k$  обозначает поэлементное возведение в степень  $k$  каждого элемента вектора  $\mathbf{z}$ . Следует отметить, что при  $i=1$  и  $d^2 = \sigma_x^2$  уравнение (8) полностью совпадает с уравнением для получения линейной оценки MMSE.

Для предложенного негауссовского априорного распределения (8) оценка минимума среднеквадратического отклонения в отличие от известных алгоритмов MMSE является нелинейной (NMMSE), выражение математических ожиданий (апостериорных средних) представляет собой многомерный интеграл (8), для вычисления которого был использован метод Монте-Карло.

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{x}}_p &= \int_{\Omega_x} \mathbf{x} p_{ps}(\mathbf{x}|\mathbf{y}) d\mathbf{x} = \\ &= \frac{\int_{\Omega_x} \mathbf{x} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma_\eta^2} (\mathbf{y} - \mathbf{H}\mathbf{x})^T (\mathbf{y} - \mathbf{H}\mathbf{x}) - \frac{1}{(2d^2)^i} \sum_{m=1}^{2M} x_m^{2i}\right) d\mathbf{x}}{\int_{\Omega_x} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma_\eta^2} (\mathbf{y} - \mathbf{H}\mathbf{x})^T (\mathbf{y} - \mathbf{H}\mathbf{x}) - \frac{1}{(2d^2)^i} \sum_{m=1}^{2M} x_m^{2i}\right) d\mathbf{x}}. \end{aligned} \quad (8)$$

Полученные методом Монте-Карло NMMSE оценки QAM-символов использовались для демодуляции и выделения оценок кодированных битов. Для исследования правомерности предложенного вида аппроксимации и анализа эффективности было проведено статистическое моделирование и получены характеристики помехоустойчивости. На рисунке 9 представлены зависимости FER



в системе MIMO с помехоустойчивым кодированием антенной конфигурации 16×16 для алгоритмов демодуляции: NMMSE - метод Монте-Карло для негауссовского распределения (8) с параметром  $i = 4$  (MC4), демодулятор K-Best с числом проверяемых комбинаций 1024 (Kbest-1024) и алгоритм MMSE.

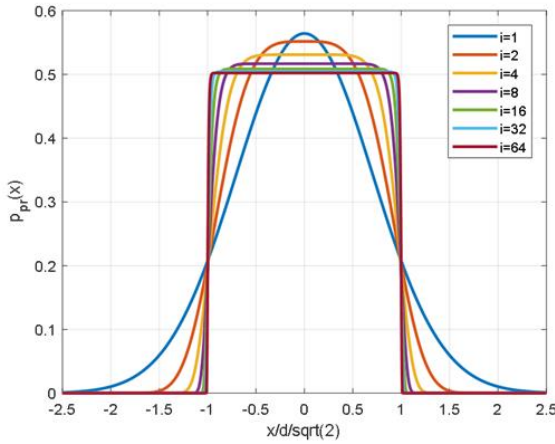


Рисунок 8

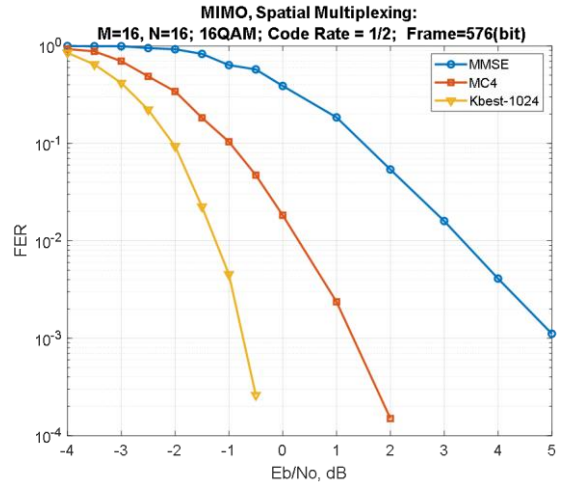


Рисунок 9

Энергетический выигрыш предложенного алгоритма NMMSE по сравнению с линейным алгоритмом MMSE составляет более 3 дБ (при  $FER = 0,01$ ). При этом алгоритм NMMSE проигрывает алгоритму K-best, близкому к алгоритму ML, лишь порядка 1,5 дБ. Что доказывает правильность предложенного вида аппроксимации априорного распределения.

Решать систему нелинейных уравнений (8) можно разными способами, например, с помощью итерационных методов.

В работе для этой цели использовался итерационный метод Ньютона (19) также известный как метод касательных, однако он требует вычисления обратной матрицы Якоби (19) на каждой итерации, что является серьезным недостатком. Поэтому был предложен модифицированный метод Ньютона, представленный формулой (22). Для последнего нет требований к выбору начального приближения  $\hat{\mathbf{x}}_{MAP}^{(0)}$ , и достаточно вычисление матрицы Якоби лишь один раз. Итерационные уравнения (19) и (22) позволяют получить оценки QAM-символов за  $p$  итераций.

$$\hat{\mathbf{x}}_{MAP}^{(p)} = \hat{\mathbf{x}}_{MAP}^{(p-1)} - \left( \mathbf{W}(\hat{\mathbf{x}}_{MAP}^{(p-1)}) \right)^{-1} \mathbf{f}(\hat{\mathbf{x}}_{MAP}^{(p-1)}) \quad (9)$$

$$\mathbf{f}(\hat{\mathbf{x}}_{MAP}) = \mathbf{A} + \mathbf{B}\hat{\mathbf{x}}_{MAP} + \mathbf{C}[\hat{\mathbf{x}}_{MAP}]^{2i-1}$$

$$\mathbf{A} = \frac{1}{\sigma_\eta^2} \mathbf{H}^T \mathbf{y}, \quad \mathbf{B} = -\frac{1}{\sigma_\eta^2} \mathbf{H}^T \mathbf{H}, \quad \mathbf{C} = -\frac{2i}{(2d^2)^i}, \quad (9)$$

$$\mathbf{W}(\hat{\mathbf{x}}_{MAP}^{(p-1)}) = \mathbf{B} + \mathbf{C} \cdot (2i-1) \cdot \text{diag} \left( \begin{bmatrix} \hat{x}_1^{(p-1)} \\ \vdots \\ \hat{x}_{2M}^{(p-1)} \end{bmatrix}^{(2i-2)} \right) \quad (10)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_{MAP}^{(p)} = \hat{\mathbf{x}}_{MAP}^{(p-1)} - (\mathbf{B} + C(2i-1)\mathbf{I}_{2M})^{-1} \mathbf{f}(\hat{\mathbf{x}}_{MAP}^{(p-1)}) . \quad (11)$$

Характеристики помехоустойчивости алгоритмов на основе модифицированного метода Ньютона (mNw) и обычного метода Ньютона (Nw) показывают результат лучше, чем MMSE. Отличие в помехоустойчивости между алгоритмом Nw и алгоритмом mNw при 8 итерациях составляет всего 0,05 дБ на уровне  $FER = 0,01$ , при этом алгоритм mNw имеет существенно более низкую вычислительную сложность.

Из рисунка 10 видно, что в системе MIMO антенной конфигурации  $32 \times 32$ , модуляцией 256QAM и помехоустойчивым кодированием, применяя негауссовскую аппроксимацию априорного распределения и итерационные методы Ньютона (Nw) и модифицированного метода Ньютона (mNw) при 8 итерациях, получен выигрыш по сравнению с линейным алгоритмом MMSE более 6 дБ при вероятности ошибки на кадр 0,01. Этот результат на 1,3 дБ отличается от результата, полученного с помощью метода Монте-Карло с параметром  $i=2$  (MC2). Алгоритм K-best при  $K=256$  (Kbest-256) и алгоритм NMMSE метода Монте-Карло с параметром  $i=8$  (MC8) имеют преимущество примерно в 12 дБ над MMSE. Схожесть характеристик помехоустойчивости уверенно подтверждает правомерность использования предложенных негауссовской аппроксимации и итерационных алгоритмов.

Из рисунка 11 видно, что для антенной конфигурации  $96 \times 96$ , т.е. с ростом числа антенн, предложенный алгоритм mNw обладает выигрышем в помехоустойчивости по сравнению с алгоритмом K-best с параметром  $K=256$  порядка 1,5 дБ, а с алгоритмом MMSE – около 7 дБ на уровне  $FER = 0,01$ .

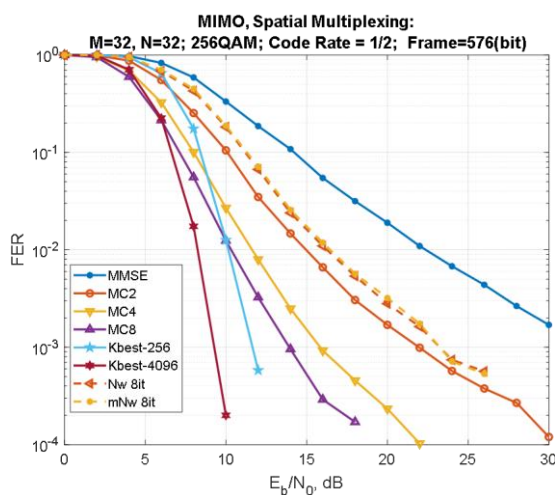


Рисунок 10

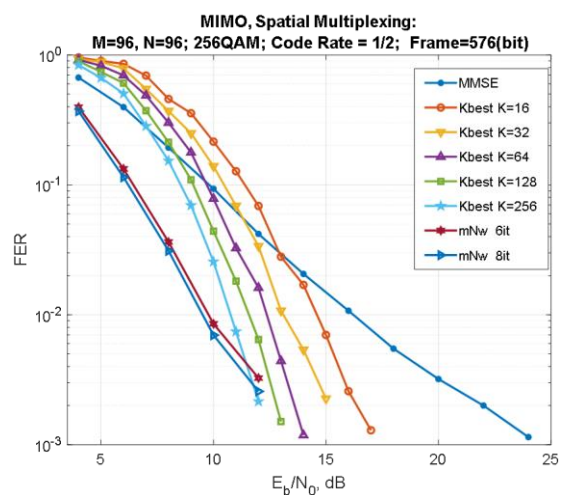


Рисунок 11

Основанный на использовании негауссовской аппроксимации априорного распределения алгоритм модифицированного метода Ньютона имеет приемлемую вычислительную сложность и при увеличении числа антенн и кратности модуляции обладает эффектом улучшения характеристик помехоустойчивости.

В четвертом разделе было проведено сравнение различных алгоритмов демодуляции по числу необходимых для их выполнения арифметических

операций, т.е. числа операций умножения/деления, сложения/вычитания над действительными числами с плавающей точкой, а также была получена оценка возможности реализации разработанных алгоритмов на цифровых сигнальных процессорах (ЦСП) и при использовании программируемых логических интегральных схем (ПЛИС, Field-Programmable Gate Array FPGA).

Результаты вычислительной сложности алгоритмов демодуляции для систем ММО с разным числом антенн получены при условии, когда число передающих антенн равно числу приемных антенн, т.е. конфигурации  $M \times M$ , и представлены в таблице 1. Для большей наглядности был построен график (рисунок 12).

Таблица 1

Алгоритм	Общее число операций
MMSE	$8M^3 + 9M^2 - 4M$
Нелинейный метод Чебышева	$(24M^2 + 6M) \cdot i_{\max}$
Модифицированный метод Ньютона	$(8 \cdot M^3 + 10 \cdot M^2 + M) + (16 \cdot M^2 + 8 \cdot M)(i_{\max} - 1)$

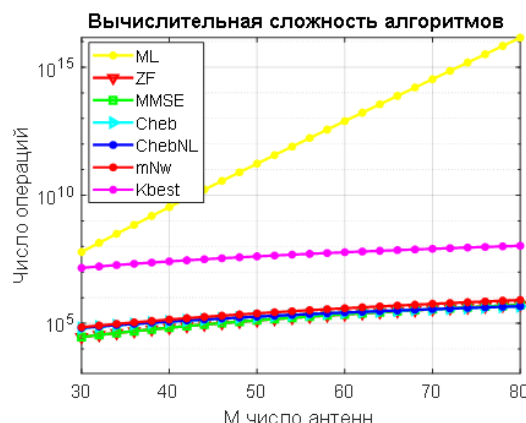


Рисунок 12

Из рисунка 12 хорошо видно, что алгоритмы ZF, MMSE, линейного и нелинейного методов Чебышева, а также модифицированного метода Ньютона имеют примерно одинаковый порядок сложности, а вот алгоритмы с перебором (K-best, ML) существенно сложнее.

На рисунке 13 показано сравнение алгоритмов MMSE, линейного (Cheb) и нелинейного метода Чебышева (ChebNL), модифицированного метода Ньютона (mNw) в системе ММО антенной конфигурации  $64 \times 64$  с модуляцией 16QAM.

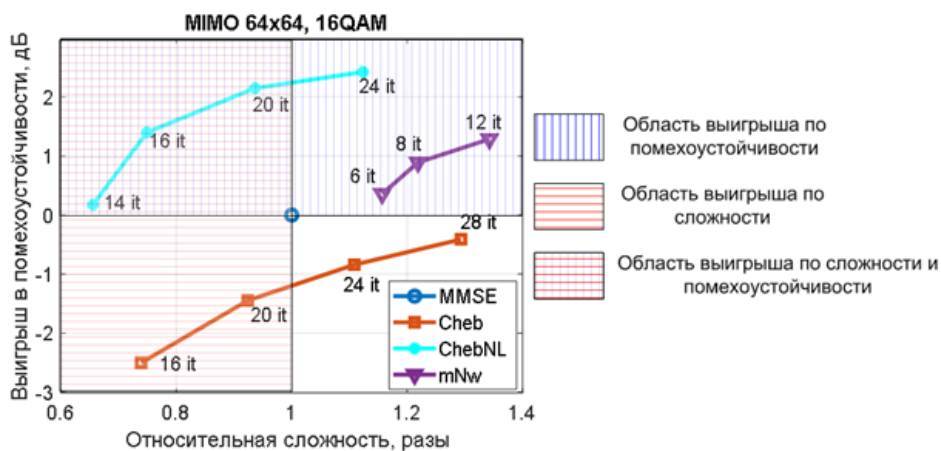


Рисунок 13

Алгоритм нелинейного метода Чебышева превосходит алгоритм MMSE не только в помехоустойчивости, но и в сложности. Например, нелинейный метод Чебышева при 16 итерациях обеспечивает выигрыш в помехоустойчивости 1,4 дБ,

при этом его сложность составляет 73% (на 27% меньше) сложности алгоритма MMSE, а при 20 итерациях сложность составляет 90% (на 10% меньше) сложности алгоритма MMSE при выигрыше в помехоустойчивости порядка 2,2 дБ. Хотя основная область применения алгоритма модифицированного метода Ньютона - это системы Massive MIMO с высокой кратностью модуляции, но и при малом порядке модуляции (16QAM) он показывает преимущество в помехоустойчивости порядка 1 дБ по сравнению с алгоритмом MMSE.

На рисунке 14 показано сравнение алгоритмов MMSE, K-best и модифицированного метода Ньютона (mNw) в системе MIMO антенной конфигурации  $64 \times 64$  с использованием модуляции высокого порядка (256QAM).

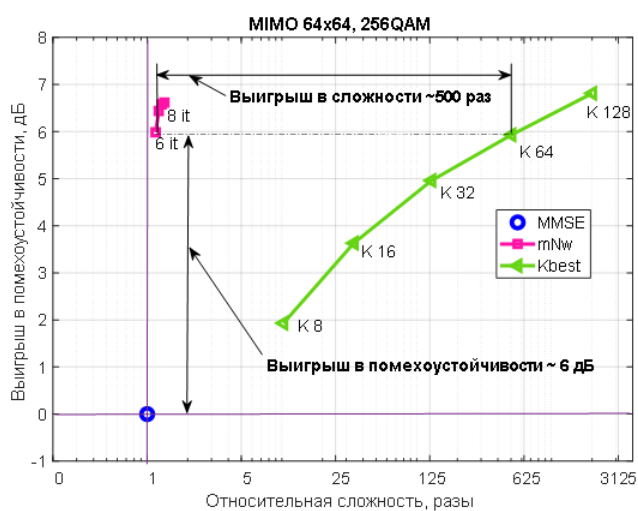


Рисунок 14

Предложенный алгоритм демодуляции на основе модифицированного метода Ньютона по сравнению с алгоритмом MMSE обеспечивает выигрыш в помехоустойчивости примерно 6 дБ при увеличении сложности обработки в 1,17 раза (всего на 17%), в то же время выигрыш в сложности по сравнению с алгоритмом K-best при той же помехоустойчивости составляет около 500 раз.

При использовании модифицированного метода Ньютона и негауссовской аппроксимации априорного распределения с увеличением порядка модуляции характеристики помехоустойчивости становятся лучше характеристик алгоритма MMSE.

Предложенные алгоритмы – нелинейный метод типа Чебышева и модифицированный метод Ньютона – обладают лучшими по сравнению с MMSE характеристиками помехоустойчивости, имеют вычислительную сложность реализации на FPGA на приемлемом для практических систем уровне и работоспособны в системах Massive MIMO.

**В заключении** изложены основные результаты проведенных исследований и разработок, которые сводятся к следующему.

1. Для систем MIMO с большим числом антенн с модуляцией до 16QAM разработан нелинейный итерационный алгоритм демодуляции на основе метода Чебышева с оценками собственных значений,

вычислительная сложность которого меньше или имеет тот же порядок, что и у алгоритма MMSE, при этом характеристики помехоустойчивости лучше, чем у алгоритма MMSE, более 2дБ.

2. Для систем Massive MIMO с высокой кратностью QAM-модуляции разработан новый алгоритм демодуляции с применением негауссовской аппроксимации априорного распределения и итерационного модифицированного метода Ньютона, обеспечивающего улучшение (около 6дБ) характеристик помехоустойчивости по сравнению с линейным алгоритмом MMSE при сохранении того же порядка сложности.
3. Показано, что предложенные алгоритмы могут быть реализованы и использованы для демодуляции в системах Massive MIMO.

Таким образом, цель диссертационной работы достигнута, и решена поставленная научная задача разработки итерационных алгоритмов демодуляции в системах беспроводной связи, использующих технологию MIMO с большим числом антенн, вычислительная сложность которых имеет тот же порядок, что и у алгоритма MMSE с характеристиками помехоустойчивости лучшими, чем у алгоритма MMSE.

Полученные научные результаты соответствуют пункту 15 паспорта специальности 2.2.15 «Системы, сети и устройства телекоммуникаций».

## **СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ**

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

1. Панкратов Д.Ю., Степанова А.Г. Компьютерное моделирование технологии MIMO для систем радиосвязи // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2018. Т. 12. № 12.- С. 33-37.
2. Бакулин М.Г., Крейнделин В.Б., Панкратов Д.Ю. Степанова А.Г., Новый подход к задачам MIMO-детектирования и многопользовательской демодуляции// Информационные процессы. 2021. Т. 21. № 2. - С. 93-107.
3. Бакулин М.Г., Крейнделин В.Б., Панкратов Д.Ю., Степанова А.Г. Итерационный метод демодуляции massive MIMO при негауссовской аппроксимации// Информационные процессы. 2021. Т. 21. № 3. -С. 137-148.
4. Бакулин М.Г., Крейнделин В.Б., Панкратов Д.Ю., Степанова А.Г. Анализ эффективности и сложности демодуляции с использованием негауссовской аппроксимации в системах massive MIMO // Информационные процессы. 2022. Т. 22. № 2.- С. 77-92.

### **Публикации, индексируемые в Scopus и Web of Science**

1. D. Pankratov, A. Stepanova "Linear and Nonlinear Chebyshev Iterative Demodulation Algorithms for MIMO Systems with Large Number of Antennas", 2019, 24th Conference of Open Innovations Association (FRUCT), Moscow, Russia, 2019, pp. 307-312.

2. Kreindelin V.B., Pankratov D.Y., Stepanova A.G. Analysis of Iterative Demodulation Algorithm for MIMO System with Different Number of Antennas, 2018, Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems, WECONF-2018, pp.1-4, 2018.
3. D.Y. Pankratov, A.G. Stepanova, "Nonlinear Iterative Chebyshev Based Demodulation Algorithm With Eigenvalues Estimates Of The Channel Matrix For Massive MIMO Systems", Systems of Signal Synchronization Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO) 2020, pp. 1-5, 2020.
4. Kreyndelin V.B., Pankratov D.Yu., Stepanova A.G. Chebyshev type nonlinear iterative demodulation algorithm for MIMO systems with large number of antennas, Telecommunications and Radio Engineering, 2020. № 79(13), pp. 1109-1119.
5. M.G. Bakulin, V.B. Kreindelin, D.Y. Pankratov and A.G. Stepanova "Applying a New Approximation to Demodulation in Massive MIMO Systems," 2021 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF), St. Petersburg, Russia, 2021, pp. 1-6.
6. Bakulin M.G., Kreindelin V.B., Pankratov D.Y., Stepanova A.G. A new approach to problems of MIMO detection and multiuser demodulation, Journal of Communications Technology and Electronics. 2021. Vol. 66. № 12, pp. 1460-1469.
7. Bakulin M.G., Kreindelin V.B., Pankratov D.Y., Stepanova A.G. Modified Newton's method in massive MIMO demodulation with Non-Gaussian approximation, 2022 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, SOSG 2022 - Conference Proceedings, 2022.
8. Bakulin M.G., Kreyndelin V.B., Pankratov D.Y., Stepanova A.G. Iterative massive MIMO demodulation method with Non-Gaussian approximation, Journal of Communications Technology and Electronics. 2022. Vol. 67. № 6, pp. 740-746.
9. Bakulin M.G., Kreyndelin V.B., Pankratov D.Y., Stepanova A.G. Analysis of Demodulation Efficiency and Complexity Using Non-Gaussian Approximation in Massive MIMO Systems, Journal of Communications Technology and Electronicsthis, 2022, 67(12), pp. 1542–1551.

#### **Прочие публикации**

1. Панкратов Д.Ю., Степанова А.Г. Моделирование систем МИМО// Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. 2017, Т.17. № 4. - С.1052-1056.
2. Панкратов Д.Ю., Степанова А.Г. Компьютерное моделирование технологии МИМО для систем радиосвязи. В сб.: Технологии информационного общества. Материалы XII Международной отраслевой научно-технической конференции. 2018- С.191-194.
3. Крейнделин В.Б., Панкратов Д.Ю., Степанова А.Г. Помехоустойчивость систем МИМО в условиях неточной матрицы канала на приемной стороне.

- 1-я Всероссийская конференция «Современные технологии обработки сигналов». - М. Россия, доклады конференции.- С. 42-46.
4. **Степанова А.Г.** Применение метода Чебышева для демодуляции в системах ММО. Труды международной научно-технической конференции «Телекоммуникационные и вычислительные системы – 2018». – М.: Горячая линия – Телеком, 2018. -С. 255-259.
  5. Панкратов Д.Ю., Степанова А.Г. Алгоритм демодуляции на основе метода Чебышева для систем ММО // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. 2018. Т.18. № 4. - С.1057-1061.
  6. **Степанова А.Г.** Нелинейный демодулятор Чебышева для систем ММО. В сб.: Технологии информационного общества // Материалы XIII Международной отраслевой научно-технической конференции. 2019. - С. 224-226.
  7. Панкратов Д.Ю., Степанова А.Г. Нелинейный итерационный демодулятор систем ММО для различных видов модуляции. В сб.: Современные технологии обработки сигналов. 2-я Всероссийская конференция: доклады конференции. 2019.- С. 82-86.
  8. D.Y. Pankratov, A.G. Stepanova. Linear iterative demodulation algorithm for MIMO systems with large number of antennas. В сб.: Proceedings of the International Conference Technology & Entrepreneurship in Digital Society (TEDS). Proceedings of the International Conference, 2019, pp. 61-64.
  9. Панкратов Д.Ю., Степанова А.Г. Вычислительная сложность алгоритмов демодуляции систем ММО с большим числом антенн DSPA // Вопросы применения цифровой обработки сигналов. 2021, Т. 11. № 1. - С. 11-20.
  10. Крейнделин В.Б., Панкратов Д.Ю., Степанова А.Г. Нелинейный итерационный демодулятор систем ММО с большим числом антенн для различных видов модуляции. В сб.: Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий - РЭУС-2020. М. 2020.- С. 26-30.
  11. Комаров М.И., Панкратов Д.Ю., Степанова А.Г., Чуманов А.Е. Помехоустойчивость и вычислительная сложность алгоритмов демодуляции для систем ММО с разным числом антенн. DSPA // Вопросы применения цифровой обработки сигналов. 2022. Т. 12. № 1.- С. 39-47.
  12. Бакулин М.Г., Панкратов Д.Ю., Степанова А.Г. Моделирование системы радиосвязи с разным числом передающих антенн: Учебное пособие для студентов по направлениям подготовки 11.03.02 и 11.04.02, ЭБС/МТУСИ. М., 2022.- 52с.