

**УТВЕРЖДАЮ**

И.о. директора ИППИ РАН,  
чл.-корр. РАН



Федоров М.В.

«19» декабря 2023 г.

### **ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ**

на диссертацию Степановой Анастасии Георгиевны на тему: «Исследование и разработка итерационных алгоритмов демодуляции в системах беспроводной связи, использующих технологию MIMO с большим числом антенн», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.15 «Системы, сети и устройства телекоммуникаций»

#### **1. Актуальность темы исследования**

Взрывной рост потребностей абонентов сетей беспроводной связи ставит сложные задачи комплексной передачи, обработки данных в условиях жесткого ограничения временных, энергетических и частотных ресурсов. Наиболее экономически оправданным является путь повышения эффективности использования радиочастотного спектра за счет применения технологий многоантенных систем — MIMO (Multiple Input Multiple Output), в частности, технологии Massive MIMO, в которой используются десятки или сотни антенн. Эта технология позволяет получить высокую спектральную эффективность и высокую энергетическую эффективность беспроводных систем связи, однако увеличение числа антенн приводит к существенному усложнению алгоритмов демодуляции, поэтому для практической реализации нужны высокоэффективные демодуляторы с низкой сложностью и хорошим качеством по помехоустойчивости. Вопрос разработки таких демодуляторов

Вход. № 95/23  
«26» 12 2023г.  
подпись

требует особого внимания и представляет огромный интерес в настоящее время.

## **2. Структура и основные результаты работы**

Диссертация содержит 162 страницы текста, иллюстрируется 43 рисунками, 17 таблицами и состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка сокращений, списка литературы и приложения.

**Введение** содержит обоснование актуальности темы диссертационной работы, сформулированы цель и основные направления исследований, приведен краткий обзор существующих и предлагаемых методов решения поставленных задач.

**В первом разделе** дано краткое описание ключевых принципов технологий ММО, включая Massive ММО. Проведен сравнительный анализ помехоустойчивости известных алгоритмов демодуляции в системах ММО 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 ММО.

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

1. В системах Massive ММО с модуляцией 16 QAM использование разработанного нелинейного итерационного алгоритма типа Чебышева позволяет обеспечить энергетический выигрыш в помехоустойчивости порядка 2,3 дБ при коэффициенте ошибочных кадров 1% по сравнению с алгоритмом MMSE, а с линейным алгоритмом типа Чебышева – порядка 3,2 дБ.
2. Предложенный нелинейный алгоритм типа Чебышева обеспечивает более высокую скорость сходимости по сравнению с линейным

алгоритмом типа Чебышева, и позволяет достигать характеристик алгоритма MMSE при меньшем числе итераций: выигрыш по числу итераций составляет примерно 2 раза при сложности меньшей, чем у алгоритма MMSE.

**В третьем разделе** предлагаются новые нелинейные алгоритмы демодуляции с негауссовской аппроксимацией априорного распределения для реализации в системах Massive MIMO с большой кратностью модуляции. В частности:

1. 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.
2. Было показано, что энергетический выигрыш NMMSE алгоритма на основе негауссовской аппроксимации априорного распределения (нелинейных оценок MMSE, полученных методом Монте-Карло) по сравнению с линейным алгоритмом MMSE составляет более 3 дБ на уровне  $FER = 0,01$  для систем MIMO конфигурации  $16 \times 16$  с модуляцией 16QAM. При этом, алгоритм NMMSE проигрывает алгоритму K-best, близкому к алгоритму ML, не более 1,5 дБ. Это доказывает правильность предложенного вида негауссовской аппроксимации априорного распределения.
3. Было показано, что в результате применения негауссовской аппроксимации априорного распределения информационных символов в задаче демодуляции для систем MIMO возможно получение существенного выигрыша в помехоустойчивости по

сравнению с алгоритмом MMSE. При этом задача демодуляции сводится к решению системы нелинейных (степенных) уравнений – решение можно искать с помощью итерационных методов.

4. Показано, что применяя негауссовскую аппроксимацию априорного распределения и итерационные методы Ньютона и модифицированного метода Ньютона при 8 итерациях, получаем выигрыш по сравнению с линейным алгоритмом MMSE около 6,4 дБ при вероятности ошибки на кадр  $10^{-2}$  в системе MIMO конфигурации антенн  $64 \times 64$ , модуляцией 256QAM и помехоустойчивым кодированием.
5. При использовании модифицированного метода Ньютона выигрыш составляет от 2 дБ до 7 дБ ( $FER=0,01$ ) по сравнению с алгоритмом MMSE в зависимости от кратности модуляции, числа антенн в системе. Экспериментально было доказано, что для более сложных конфигураций систем Massive MIMO с увеличением порядка модуляции предложенный алгоритм с использованием негауссовской аппроксимации и модифицированного метода Ньютона становится более эффективным.

**В четвертом разделе** было проведено сравнение вычислительной сложности различных алгоритмов демодуляции по числу необходимых для их выполнения арифметических операций, а также была получена оценка возможности реализации разработанных алгоритмов. Было показано:

1. Алгоритмы MMSE, линейного и нелинейного методов Чебышева, а также модифицированного метода Ньютона имеют примерно одинаковый порядок сложности, а алгоритмы с перебором (K-best, ML) существенно сложнее.
2. Для системы Massive MIMO  $64 \times 64$  с модуляцией 16QAM алгоритм нелинейного метода Чебышева превосходит алгоритм MMSE не только в помехоустойчивости, но и в сложности. Например, алгоритм нелинейного метода 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.

3. Для систем Massive MIMO с кратностью модуляции 256QAM и выше использование предложенной негауссовской аппроксимации априорного распределения совместно с модифицированным методом Ньютона позволяет обеспечить выигрыш в помехоустойчивости примерно 6 дБ по сравнению с алгоритмом MMSE при увеличении сложности обработки в 1,17 раза (всего на 17%), а по сравнению с алгоритмом K-best при равной помехоустойчивости выигрыш в сложности составляет около 500 раз.
4. Предложенные алгоритмы нелинейного метода Чебышева, модифицированного метода Ньютона, реализованные на FPGA можно использовать для демодуляции в системах Massive MIMO.

**Заключение** содержит итоги выполненного диссертационного исследования.

В **приложении** представлены акты о внедрении и использовании результатов диссертационной работы.

### **3. Научная новизна**

1. Разработан нелинейный итерационный алгоритм демодуляции для систем MIMO с конфигурацией  $64 \times 64$  и модуляцией 16QAM 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.

#### **4. Теоретическая значимость и практическая ценность**

Теоретическая значимость результатов диссертации заключается в том, что в диссертации показана эффективность учета априорной информации о передаваемом сигнале в виде нелинейной функции в алгоритмах демодуляции для систем Massive MIMO на основе метода Чебышева. Предложен новый вид негауссовской аппроксимации для синтеза алгоритмов демодуляции. Доказано, что при использовании предложенной аппроксимации априорного распределения, задача оценивания модулированных символов сводится к задаче решения системы степенных уравнений. Установлено, что использование новой негауссовской аппроксимации априорного распределения позволяет получать высокоэффективные алгоритмы демодуляции в системах Massive MIMO с высоким порядком модуляции без необходимости перебора комбинаций информационных символов. 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.

Диссертационные исследования имеют практическую значимость для разработчиков систем беспроводной связи по технологии Massive MIMO. Результаты диссертационной работы:

- нелинейный итерационный алгоритм демодуляции для систем MIMO с большим числом антенн на основе метода Чебышева с оценками собственных значений, вычислительная сложность которого имеет тот же порядок, что и у алгоритма MMSE, при этом его характеристики помехоустойчивости лучше, чем у алгоритма MMSE,
  - новый алгоритм демодуляции для систем Massive MIMO с высокой кратностью модуляции QAM с применением негауссовской аппроксимации априорного распределения передаваемых информационных символов и модифицированного метода Ньютона, обеспечивающий лучшие характеристики помехоустойчивости по сравнению с алгоритмом MMSE при том же порядке сложности,
- были использованы при разработке алгоритмов демодуляции на базовой станции с большим числом антенн систем радиосвязи 5G по теме «Развитие новой технологии неортогонального доступа (NOMA) и ее использование совместно с технологией MIMO для перспективных систем связи 6G». Применение разработанного алгоритма на основе негауссовской аппроксимации и модифицированного метода Ньютона позволило получить энергетический выигрыш порядка 6 дБ для конфигурации антенн  $32 \times 32$  модуляцией 256QAM по сравнению с известным алгоритмом MMSE. При использовании для демодуляции в системе MIMO с конфигурацией  $64 \times 64$  и модуляцией 16QAM нелинейного алгоритма на основе метода Чебышева получен выигрыш порядка 2 дБ с сокращением времени обработки на 7 % по сравнению с алгоритмом MMSE.

## **5. Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций**

Достоверность и обоснованность полученных научных положений и выводов обусловлена корректным применением таких методов исследований, как методы статистической радиотехники, теории связи, теории численных методов, теории вероятностей и математической статистики, теории вычислительной сложности алгоритмов, имитационного компьютерного моделирования, а также публикациями в рецензируемых изданиях, в том числе, в том числе, 4 публикации в российских журналах, включенных ВАК РФ в перечень для опубликования материалов диссертаций, и 9 публикаций в международных научных изданиях, входящих в международные базы данных Scopus и Web of Science, и обсуждением результатов исследования на международных и всероссийских научных конференциях.

## **6. Личный вклад автора**

Все выносимые на защиту результаты и положения, составляющие основное содержание диссертационной работы, в том числе опубликованные в соавторстве, получены Степановой А.Г. лично.

## **7. Соответствие работы паспорту научной специальности**

Результаты исследования соответствуют паспорту научной специальности 2.2.15 «Системы, сети и устройства телекоммуникаций», а именно:

П.15. Исследование и разработка новых сигналов, а также соответствующих модемов, кодеков, мультиплексоров и селекторов, обеспечивающих высокую надежность и качество обмена информацией в условиях воздействия внешних и внутренних помех



## **8. Апробация результатов работы**

Результаты диссертационной работы полно изложены в 4 публикациях в рецензируемых научных изданиях, включенных в Перечень ВАК, 9 статьях в изданиях, включенных в базы Scopus и WoS, и 12 прочих работах. Также результаты прошли апробацию и были доложены на международных и всероссийских конференциях.

## **9. Рекомендации по использованию результатов диссертации**

Предложенные Степановой А.Г. алгоритмы могут быть реализованы и использованы для демодуляции в системах Massive MIMO. Основные положения и выводы диссертации Степановой А.Г. могут быть использованы в НИР, направленных на повышение качества демодуляции в системах Massive MIMO. Кроме того, результаты могут быть востребованы в научно-практической и педагогической работе, проводимой в высших учебных заведениях при подготовке инженерных и научных кадров в области связи и телекоммуникаций, например, в ИППИ РАН, МФТИ, СПбГУТ, МТУСИ и других научных и производственных организациях, занимающихся исследованиями и разработкой в области телекоммуникаций.

## **10.Замечания по диссертации**

К замечаниям по результатам диссертационной работы следует отнести следующее:

- В работе не рассмотрены перспективы реализации разработанных алгоритмов с помощью аппаратных средств.
- В работе при постановке задачи исследования недостаточно подробно объясняется, системе какого стандарта и в каком режиме соответствует выбранная математическая модель системы MIMO.
- При использовании выбранной модели при проведении исследования не учитывалось влияние ошибок оценки матрицы канала и пространственной корреляции, а также влияние мощности.

Указанные недостатки не снижают значимость полученных результатов и не влияют на общую положительную оценку работы, защищаемые положения которой обладают научной новизной и практической значимостью.

## **11. Заключение**

Диссертационная работа А.Г. Степановой является законченной научной квалификационной работой, выполненной на актуальную тему. По новизне, уровню научной проработки и практической значимости полученных результатов работа отвечает требованиям п. 9 Постановления Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 «Положение о присуждении учёных степеней», а её автор, Анастасия Георгиевна, заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.15 «Системы, сети и устройства телекоммуникаций».

Отзыв на диссертацию обсуждён и одобрен на расширенном научном семинаре лабораторий № 17 и 18 10 декабря 2023 г., протокол № 1.

Заведующий лабораторией № 18,

Д.т.н., проф., [lyakhov@iitp.ru](mailto:lyakhov@iitp.ru)



Ляхов А.И.

**Почтовый адрес:** 127051, г. Москва, Б. Каретный пер., 19, стр.1

**Телефон:** 8 (495) 650-42-25,

**Адрес электронной почты:** [director@iitp.ru](mailto:director@iitp.ru)

**Организация – место работы:** Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича Российской академии наук (ИППИ РАН), лаб.№18

**Должность:** Заведующий лабораторией

**Web-сайт организации:** <https://iitp.ru>