

ОТЗЫВ

официального оппонента Хорова Евгения Михайловича 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

Рост потребностей пользователей сетей беспроводной связи ставит сложные задачи комплексной передачи, обработки данных в условиях жесткого ограничения частотно-временных ресурсов. Перспективным путем повышения эффективности использования радиочастотного спектра является применения технологии Massive MIMO (Multiple Input Multiple Output, MIMO), в которой используются десятки-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 требует особого внимания и представляет огромный интерес в настоящее время.

Вход. № 96/23
«26» 12 2023 г.
подпись

2. Краткая характеристика работы

Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка сокращений, списка литературы, и приложения.

Введение содержит обоснование актуальности темы диссертационной работы, сформулированы цель и основные задачи исследования, 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.

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. Показано, что в системах Massive MIMO с модуляцией 16QAM разработанный нелинейный алгоритм типа Чебышева:

1. позволяет обеспечить энергетический выигрыш в помехоустойчивости порядка 2,3 дБ при доле ошибочных кадров 1% по сравнению с алгоритмом MMSE, а с линейным алгоритмом типа Чебышева – порядка 3,2 дБ;
2. обеспечивает более высокую скорость сходимости по сравнению с линейным алгоритмом, и позволяет достигать характеристик алгоритма MMSE при меньшем числе итераций.

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

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. С помощью этого семейства распределений можно синтезировать нелинейные алгоритмы демодуляции с характеристиками помехоустойчивости лучше, чем у алгоритма MMSE. Показано, что:

1. энергетический выигрыш алгоритма на основе негауссовской аппроксимации априорного распределения по сравнению с линейным алгоритмом MMSE составляет более 3 дБ на уровне $FER = 0,01$ для систем MIMO конфигурации 16×16 с модуляцией 16QAM;
2. благодаря негауссовской аппроксимации априорного распределения информационных символов в задаче демодуляции возможно получение существенного выигрыша в помехоустойчивости по сравнению с алгоритмом MMSE; при этом задача демодуляции сводится к решению системы нелинейных уравнений, которые можно решать итерационными методами;
3. модифицированный метода Ньютона дает выигрыш от 2 дБ до 7 дБ ($FER=0,01$) по сравнению с алгоритмом MMSE в зависимости от кратности модуляции, числа антенн в системе.

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

1. алгоритмы MMSE, линейного и нелинейного методов Чебышева, а также модифицированный метода Ньютона имеют примерно одинаковый порядок сложности;

2. алгоритм нелинейного метода Чебышева при 16-20 итерациях обеспечивает выигрыш в помехоустойчивости 1,4-2,2 дБ, при этом его сложность меньше сложности алгоритма MMSE;
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

Получены следующие новые результаты.

1. Разработан нелинейный итерационный алгоритм демодуляции для систем MIMO с конфигурацией 64×64 и модуляцией 16QAM на основе метода Чебышева с оценками собственных значений.
2. 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.

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.

4. Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, их достоверность

Обоснованность научных положений и выводов, сформулированных в диссертации, подтверждается:

- корректностью аналитических выводов;
- численным моделированием;
- обсуждением результатов исследования на международных и всероссийских научных конференциях.

Результаты опубликованы в журналах, входящих в Перечень ВАК Минобрнауки России, а также в ряде работ в изданиях, индексируемых в международных базах цитирования Scopus и Web of Science.

5. Теоретическая значимость

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, для вычисления оценок максимума апостериорной плотности вероятности (Maximum A posteriori Probability, MAP), нужно решать систему нелинейных (степенных) уравнений.

3. Установлена высокая эффективность использования новой негауссовской аппроксимации априорного распределения в алгоритмах демодуляции в системах Massive MIMO с высоким порядком модуляции без необходимости перебора комбинаций информационных символов.

6. Практическая значимость

Диссертационные исследования имеют практическую значимость для разработчиков систем беспроводной связи по технологии Massive MIMO.

Результаты диссертационной работы

- разработка нелинейного итерационного алгоритма 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, чем у алгоритма MMSE,
 - разработка нового алгоритма демодуляции для систем Massive MIMO с высокой кратностью модуляции QAM с применением негауссовской аппроксимации априорного распределения передаваемых информационных символов и модифицированного метода Ньютона, обеспечивающего 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 32×32 модуляцией 256QAM по сравнению с известным алгоритмом MMSE. При использовании для демодуляции в системе MIMO с конфигурацией 64×64 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.

7. Замечания по диссертации

1. В диссертации недостаточно подробно отражены недавние работы по теме диссертации. В полученных результатах исследования разделов 2 и 3 отсутствуют сравнения с другими квазиоптимальными алгоритмами демодуляции (кроме алгоритма K-Best и линейного метода Чебышева), также при оценке вычислительной сложности в 4 разделе рассмотрена лишь часть из них.
2. Значения параметров технологий беспроводной связи, приведенные в разделе 1.2 требуют незначительных уточнений.
3. Схемы на рис. 1.3 и 1.4 подразумевают, что число антенн на базовой станции не меньше, чем суммарное число антенн на абонентских устройствах. Насколько результаты диссертации применимы, если указанное условие не выполняется?
4. При проведении моделирования не учитывалось влияние ошибок оценки матрицы канала и пространственной корреляции, а также влияние мощности. Также не учитывалось влияние алгоритмов регулировки мощности сигналов абонентских станций и прекодирования на демодуляцию на стороне базовой станции.
5. К работе имеются множественные замечания редакторского характера (например, описки).

6. Общая оценка диссертации

Несмотря на перечисленные замечания, диссертационная работа Степановой Анастасии Георгиевны заслуживает положительную оценку.

В работе достигнута ее цель – решена значимая научная задача разработки 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.

Для достижения цели применены методы статистической радиотехники, теории цифровой связи, теории алгоритмов, теории вероятностей, математической статистики и статистического моделирования.

Диссертация представляет собой законченную работу, обладающую внутренним единством, содержит новые научные результаты. Структура работы выстроена последовательно в соответствии с поставленными задачами исследований и содержит актуальные результаты, имеющие теоретическую и практическую значимость.

Диссертационная работа содержит новые научные результаты, свидетельствующие о вкладе автора в науку, которые в целом соответствуют пункту 15 паспорта специальности 2.2.15 «Системы, сети и устройства телекоммуникаций». Автореферат полностью отражает основные научные результаты и содержание диссертации.

7. Заключение

Диссертация на тему: «Исследование и разработка итерационных алгоритмов демодуляции в системах беспроводной связи, использующих технологию ММО с большим числом антенн» удовлетворяет требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор Степанова

Анастасия Георгиевна заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.2.15 «Системы, сети и устройства телекоммуникаций».

Официальный оппонент


Хоров Евгений Михайлович

«21» декабря 2023 года

Сведения об официальном оппоненте:

Хоров Евгений Михайлович, доктор технических наук, доцент,
Специальность: 05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций.

Ведущий научный сотрудник, руководитель лаборатории беспроводных сетей Института проблем передачи информации имени А.А. Харкевича РАН.

Адрес: 127051, г.Москва, Б. Каретный пер., 19, стр.1

E-mail: e@khorov.ru

Тел.: + 7 (926) 826-52-94

Подпись Хорова Е.М.

ЗАВЕРЯЮ

Луцик Н.А.,

начальник ОК

