

ОТЗЫВ

официального оппонента кандидата технических наук, доцента Евсеева Виктора Валерьевича о диссертации Степановой Анастасии Георгиевны на тему: «Исследование и разработка итерационных алгоритмов демодуляции в системах беспроводной связи, использующих технологию ММО с большим числом антенн», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.15 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций.

Развитие современных телекоммуникационных сетей связано с постоянным поиском технических путей построения помехоустойчивых беспроводных систем связи, обеспечивающих требуемую степень достоверности информационного обмена в условиях деструктивных воздействий, а также высокую скорость передачи данных. При разработке систем беспроводной связи последнего поколения для достижения вышеуказанных показателей активно используется технология ММО – Multiple Input Multiple Output. Данная технология связана с применением многоэлементных антенных систем, что позволяет повысить скорость передачи за счет мультиплексирования или улучшить эксплуатационные показатели за счет пространственного разнесения. В системах, использующих технологию ММО, речь идет о разнесении как передающих, так и приемных элементов антенных систем. При мультиплексировании организуются независимые пути прохождения сигналов, которые могут использоваться для передачи независимых друг от друга данных.

Повышенный интерес к системам ММО возник благодаря высокой эффективности использования спектра в беспроводных системах с многоэлементными передающими и приемными антеннами, а также возможности снижения межсимвольных и внутрисистемных помех. Однако платой за повышение эксплуатационных показателей при использовании технологии ММО являются дополнительные расходы на установку многоэлементных антенн, соблюдение требований к их пространственному размещению, необходимости распределения мощности для антенных элементов, а также повышение сложности устройств приема из-за необходимости многомерной обработки сигналов.

Поиск путей упрощения алгоритмов обработки сигналов при одновременном сокращении вычислительных затрат на их реализацию при условии обеспечения требуемого уровня помехоустойчивости систем беспроводной связи с технологией ММО является актуальной научной задачей. Степень необходимости ее решения возрастает при использовании технологии Massive ММО, предполагающей использование большого числа передающих и приемных антенн.

Таким образом, тема диссертации Степановой А.Г. «Исследование и разработка итерационных алгоритмов демодуляции в системах беспроводной связи, использующих технологию ММО с большим числом антенн», посвященной разработке эффективных с точки зрения помехоустойчивости алгоритмов демодуляции сигналов систем беспроводной связи с технологией ММО, отличающихся приемлемой вычислительной сложностью, является актуальной.

В диссертации на основании выполненных автором исследований синтезированы итерационные алгоритмы демодуляции сигналов для систем беспроводной связи, использующих технологию ММО с большим числом передающих и приемных антенн, отличающиеся лучшими характеристиками помехоустойчивости по сравнению с алгоритмом минимума среднеквадратической ошибки (MMSE) и уровнем вычислительной сложности порядка алгоритма MMSE. При этом по уровню вычислительной сложности они значительно проще известных алгоритмов, таких как K-best, максимального правдоподобия (ML).

Содержание работы, раскрывающее суть полученных соискателем результатов, сформулированных на их основе выводов и рекомендаций, изложено в четырех главах.

В первой главе диссертации проведен сравнительный анализ помехоустойчивости известных алгоритмов демодуляции в системах ММО различных конфигураций, на основе которого сформулирована научная задача исследования, раскрывающая потребность разработки новых алгоритмов демодуляции с хорошими характеристиками помехоустойчивости и приемлемой вычислительной сложностью с целью их реализации в системах Massive ММО. Обоснована необходимость синтеза демодуляторов, обладающих лучшими характеристиками помехоустойчивости, чем алгоритм MMSE при приемлемой вычислительной сложности.

Во второй главе рассмотрены линейный и нелинейный итерационные алгоритмы демодуляции для систем ММО с большим числом антенн на основе метода Чебышева с точными оценками собственных значений матрицы канала. Для улучшения характеристик линейных алгоритмов разработан нелинейный итерационный алгоритм типа Чебышева, который обеспечивает более высокую скорость сходимости по сравнению с линейным алгоритмом и позволяет достичь характеристики алгоритма MMSE при меньшем числе итераций. Показано, что разработанный нелинейный алгоритм типа Чебышева позволяет обеспечить выигрыш в помехоустойчивости по сравнению с алгоритмом MMSE, обычно используемым на практике как обладающего приемлемой помехоустойчивостью при относительно простой реализуемости. При этом

сложность разработанного нелинейного алгоритма, выражающаяся в количестве вычислительных операций, соизмерима со сложностью алгоритма MMSE.

В третьей главе предлагаются к использованию в системах Massive MIMO с большой кратностью модуляции новые нелинейные алгоритмы демодуляции с негауссовской аппроксимацией априорного распределения компонент вектора информационных параметров. Для аппроксимации априорного распределения информационных символов использовано семейство негауссовских экспоненциальных распределений, в котором гауссовское распределение и равномерное распределение являются крайними частными случаями. Использование этого семейства распределений позволило синтезировать нелинейные алгоритмы демодуляции с характеристиками помехоустойчивости лучшими, чем у алгоритма MMSE. Показано, что при учете априорного распределения информационных символов путем негауссовской аппроксимации в задаче демодуляции для систем MIMO возможно существенное увеличение выигрыша в помехоустойчивости по сравнению с алгоритмом MMSE. При этом задача демодуляции сводится к решению системы нелинейных (степенных) уравнений, которое можно найти с помощью итерационных методов.

Четвертая глава работы посвящена сравнительному анализу вычислительной сложности различных алгоритмов демодуляции, определяемой по числу необходимых для их выполнения арифметических операций, а также оцениванию возможности практической реализации разработанных алгоритмов на современной элементной базе. Показано, что разработанные нелинейные алгоритмы демодуляции для систем MIMO обладают вычислительной сложностью, соизмеримой с вычислительной сложностью известных алгоритмов демодуляции MMSE. Одновременно их вычислительная сложность оказывается существенно ниже алгоритмов с перебором K-best и максимального правдоподобия (ML). Обоснована возможность технической реализации разработанных алгоритмов демодуляции на платформе FPGA.

Тематика диссертации соответствует предметной области, определенной пунктом 15 (в части исследования и разработки модемов, обеспечивающих высокую надежность и качество обмена информацией в условиях воздействия внешних и внутренних помех) раздела «Направления исследований» паспорта специальности 2.2.15 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций.

К числу наиболее значимых научных результатов работы можно отнести следующие.

1. На основе метода Чебышева разработан нелинейный итерационный

алгоритм демодуляции с оценками собственных значений матрицы канала для систем беспроводной связи, использующих технологию MIMO с большим числом антенн, помехоустойчивость которого превосходит алгоритм MMSE при аналогичном порядке вычислительной сложности.

2. При синтезе алгоритмов демодуляции для систем MIMO предложено учитывать априорное распределение информационных символов, для аппроксимации которого использовано семейство негауссовских экспоненциальных распределений, что позволяет синтезировать нелинейные алгоритмы демодуляции с лучшими показателями помехоустойчивости по сравнению с известным алгоритмом MMSE при одинаковом порядке сложности.

3. На основе модифицированного метода Ньютона разработан новый алгоритм демодуляции для систем Massive MIMO с учетом негауссовской аппроксимации априорного распределения передаваемых информационных символов, обладающий лучшими показателями помехоустойчивости по сравнению с алгоритмом MMSE при том же порядке вычислительной сложности.

Высокая степень обоснованности научных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных автором, определяется тем, что они получены с использованием современных методов статистической радиотехники, теории связи, теории численных методов вычислений, теории вероятностей и математической статистики, теории вычислительной сложности алгоритмов.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, обеспечивается:

– применением теоретически обоснованных и прошедших апробацию методов синтеза итерационных алгоритмов обработки сигналов многопользовательских систем;

– корректным выбором ограничений, допущений и исходных данных из практики разработки алгоритмов демодуляции сигналов.

Достоверность подтверждается наглядной физической трактовкой выявленных закономерностей и эффектов, совпадением результатов теоретических исследований с данными, полученными при статистических испытаниях имитационных моделей, а также частных результатов, используемых соискателем для выполнения контрольных расчетов по разработанным методикам, с результатами, содержащимися в работах других авторов.

Анализ результатов сопровождается ясной физической трактовкой выявленных эффектов и характеристик разработанных итерационных демодуляторов систем MIMO.

Новизна научных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных по результатам выполненных исследований, связана с разработкой новых итера-

ционных алгоритмов демодуляции сигналов для систем беспроводной связи, использующих технологию Massive MIMO. Предложенные автором решения строго аргументированы и оценены в сравнении с известными аналогами.

Теоретическая значимость работы определяется тем, что показанная эффективность учета априорной информации о передаваемом сигнале в виде нелинейной функции в алгоритмах демодуляции на основе метода Чебышева, а также априорного распределения информационных символов путем его негауссовской аппроксимации расширяет возможности синтеза помехоустойчивых итерационных алгоритмов демодуляции для систем беспроводной связи, использующих технологии MIMO и Massive MIMO.

Ценность работы для практики заключается в том, что приведенные в ней результаты, выводы и рекомендации открывают направления разработки демодуляторов систем связи с технологией MIMO, эффективных в соответствии с критерием «помехоустойчивость – вычислительная сложность».

Практическая значимость результатов, полученных соискателем, подтверждается актом по их использованию при разработке алгоритмов демодуляции в базовой станции с большим числом антенн систем радиосвязи 5G в научно-исследовательском отделе МТУСИ «Перспективные технологии связи».

К числу основных замечаний и недостатков работы можно отнести следующие.

1. В работе отсутствует анализ сигнально-помеховой обстановки при функционировании систем беспроводной связи с технологией MIMO, а также обоснование требований по помехоустойчивости, которые должны предъявляться к этим системам. Эти положения составляют доказательную базу для обоснования необходимости достижения цели работы: разработки алгоритмов демодуляции, обладающих лучшими показателями помехоустойчивости по сравнению с известными алгоритмами MMSE с аналогичным порядком вычислительной сложности.

2. В работе отсутствует обоснование выбора модели Релея для статистического представления замираний в канале. На сегодняшний день известен ряд других вероятностных моделей, обладающих более широкими возможностями по описанию замираний сигнала в каналах систем беспроводной (подвижной связи), особенно с учетом сложных условий распространения (многочисленных переотражений), например, модели Райса, Накагами, логарифмическое нормальное распределение, гамма-распределение и др. Также отсутствует обоснование выбора гауссовской модели для представления аддитивных помех. При действии в системах беспроводной связи внешних помех, например, по соседнему каналу, использование такой

модели не всегда правомерно.

3. В тексте диссертации (стр. 131) с ссылкой на рисунок 4.2 представлено утверждение, что алгоритмы ZF, MMSE, линейного и нелинейного метода Чебышева, а также модифицированного метода Ньютона, имеют примерно одинаковый порядок сложности, а вот алгоритмы с перебором (K-best, ML) существенно сложнее. Алгоритм максимального правдоподобия (ML) имеет экспоненциальную сложность, хотя на рисунке 4.2, отражающем графики зависимости числа операций от числа антенн для вышеуказанных алгоритмов, вид данной зависимости для алгоритма ML линейный, а не экспоненциальный.

4. Из текста диссертации не ясно, как вид нелинейной функции нелинейного алгоритма демодуляции зависит от вида модуляции.

5. В работе имеется достаточно большое количество стилистических погрешностей, орфографических, пунктуационных ошибок и опечаток. В частности, в первой строке под рисунком 1.1 на стр. 18 содержится орфографическая ошибка, в таблице 1.2 на стр. 23 в среднем столбце последней строки содержится опечатка, в восьмой строке на стр. 45, в первой строке на стр. 49 содержатся орфографические ошибки, в последней строке на стр. 72, в четвертой строке на стр. 79 содержатся пунктуационные ошибки, в седьмой строке на стр. 83 содержится смысловая ошибка (пропущено слово), в четвертой строке на стр. 101 содержится смысловая ошибка в построении предложений, в формуле (2.4) содержится опечатка.

Несмотря на указанные замечания и недостатки, диссертационная работа Степановой А.Г. заслуживает положительной оценки.

Автореферат верно отражает содержание диссертации. В нем в лаконичной форме ясно изложены основные идеи и выводы по работе, показаны определяющий вклад соискателя в проведенные исследования, степень новизны и практическая значимость результатов.

На основе анализа диссертации Степановой А.Г. «Исследование и разработка итерационных алгоритмов демодуляции в системах беспроводной связи, использующих технологию MIMO с большим числом антенн» можно сделать выводы.

1. Диссертация «Исследование и разработка итерационных алгоритмов демодуляции в системах беспроводной связи, использующих технологию MIMO с большим числом антенн» является завершенной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований решена научная задача, имеющая значение для развития технологий систем, сетей и устройств телекоммуникаций.

2. Диссертация обладает внутренним единством, содержит новые научные

результаты, соответствующие пункту 15 раздела «Направления исследований» паспорта специальности 2.2.15 – «Системы, сети и устройства телекоммуникаций», нашедшие практическое использование при разработке алгоритмов демодуляции в базовой станции с большим числом антенн систем подвижной радиосвязи и свидетельствующие о вкладе автора в науку. Предложенные соискателем решения строго аргументированы и оценены в сравнении с известными аналогами.

3. Работа удовлетворяет требованиям Положения о присуждении ученых степеней, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Степанова А.Г., достоин присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.15 – «Системы, сети и устройства телекоммуникаций».

Официальный оппонент:

Старший научный сотрудник НИЦ (ППО и УА ВВС)

ВУНЦ ВВС «ВВА» (г. Воронеж)

кандидат технических наук (20.01.09),

доцент (по кафедре)

Евсеев Виктор Валерьевич

Подпись Евсеева В.В. заверяю.

Помощник начальника строевого отдела



А.Саввин

ВОЕННЫЙ УЧЕБНО-НАУЧНЫЙ ЦЕНТР ВОЕННО-ВОЗДУШНЫХ СИЛ
«ВОЕННО-ВОЗДУШНАЯ АКАДЕМИЯ ИМЕНИ ПРОФЕССОРА
Н.Е.ЖУКОВСКОГО И Ю.А.ГАГАРИНА» (Г. ВОРОНЕЖ)
394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54а,
тлф. 8-(473)-244-78-25, E-mail: vaiu@mil.ru