

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

кандидата технических наук

Варукиной Лидии Александровны

на диссертационную работу Хазова Михаила Леонидовича

«Разработка и исследование алгоритмов переключения антенн в системах связи ММО», представленной на соискание ученой степени

кандидата технических наук по специальности

2.2.15 – «Системы, сети и устройства телекоммуникаций»

Актуальность темы диссертационного исследования.

В современных сетях подвижной связи активно используется технология многоантенных систем (ММО - Multiple-Input-Multiple-Output), позволяющая значительно повысить спектральную и энергетическую эффективность в существующей полосе частот, что может быть конвертировано в повышение устойчивости соединения либо снижение затрат на развертывание сетей связи и на их эксплуатацию.

При постоянном росте потребления данных в сетях подвижной связи растет потребность в увеличении их емкости. Одним из способов увеличения емкости является увеличение порядка ММО. В сетях 5-го поколения используется до 64 приемопередающих трактов на базовых станциях. При этом количество излучающих элементов в таких системах может достигать 256. Принято называть технологию ММО с числом передающих трактов > 8 технологией massive ММО (mММО). Увеличение числа радиочастотных трактов приводит к росту энергопотребления и стоимости базовых станций.

Принцип переключения (автовыбора) антенн в системах связи ММО позволяет найти разумный компромисс между повышением эффективности систем связи и сложностью реализации системы связи ММО.

Тема диссертационной работы является актуальной. Разработка новых более эффективных и менее сложных алгоритмов переключения антенн в системах связи ММО необходима для создания современных и перспективных систем связи с лучшими характеристиками помехоустойчивости и приемлемыми для операторов связи и абонентов стоимостными характеристиками.

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

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

- публикациями в 4 рецензируемых научных изданиях перечня ВАК;
- апробацией на научно-технических конференциях;
- актами о внедрении результатов исследований.

Достоверность научных положений и результатов подтверждается согласованностью результатов теоретического анализа и имитационного моделирования.

Вход. № 85/23
« 20 » 12 20 23
подпись

Краткая характеристика работы.

Научная работа содержит введение, четыре раздела, заключение, список сокращений и обозначений, список литературы и два приложения.

Во введении изложена и обоснована актуальность темы, представлена цель работы, определены решаемые задачи, изложены методы решения и методы научного исследования, обозначена теоретическая значимость работы, определены объект и предмет исследований, научная новизна и практическая ценность работы, представлена информация об использовании и внедрении результатов работы, о ее апробации.

Результаты диссертационной работы получены М.Л. Хазовым самостоятельно, из публикаций с соавторами в диссертацию включены только личные результаты автора. М.Л. Хазов обобщил результаты исследований и сформулировал основные выводы. Вклад соавторов ограничивался обсуждением полученных результатов по результатам проработки лично автором совместно поставленных задач.

К выносимым на защиту основным положениям относятся:

- Новый критерий оптимальности в виде минимума следа корреляционной матрицы ошибок оценивания или демодуляции позволяет при его использовании с алгоритмом полного перебора (оптимальным алгоритмом) получить в исследованных условиях выигрыш в помехоустойчивости системы ММО 0,5 – 1,0 дБ по сравнению с лучшим из известных критериев оптимальности в виде максимума пропускной способности.
- Оптимальный алгоритм полного перебора при использовании нового критерия оптимальности обеспечивает выигрыш в вычислительной сложности в 1,5 раза по сравнению с использованием лучшего из известных критериев оптимальности в виде максимума пропускной способности.
- Низкая вычислительная сложность нового квазиоптимального алгоритма переключения (автовывбора) антенн позволяет применять его в реальных системах ММО при незначительных потерях в помехоустойчивости системы связи – до 0,5 дБ в сравнении с лучшим из известных алгоритмов переключения антенн.

В первом разделе представлена математическая модель классической системы ММО, а также системы ММО с переключением антенн, представлены и проанализированы известные алгоритмы переключения антенн, выполнена оценка помехоустойчивости системы ММО с известными алгоритмами.

В выводах к первому разделу отмечено достижение наилучших характеристик помехоустойчивости в системе с оптимальным алгоритмом (алгоритмом полного перебора). Также отмечено, что алгоритмы полного перебора обладают высокой вычислительной сложностью, что крайне

затрудняет и порой делает невозможным использование таких алгоритмов в системах mMIMO.

Во втором разделе обоснован выбор и разработан новый, обладающий меньшей вычислительной сложностью, критерий оптимальности в виде минимума следа корреляционной матрицы ошибок оценивания, выполнены исследования характеристик системы MIMO при использовании алгоритма полного перебора с новым критерием оптимальности. Использование нового критерия оптимальности в алгоритмах полного перебора показало его преимущество относительно лучшего из известных критериев.

В этом же разделе представлена и проанализирована модифицированная версия нового критерия оптимальности с еще более низкой вычислительной сложностью.

Третий раздел посвящен разработке и исследованию квазиоптимальных алгоритмов с новым критерием оптимальности в условиях отсутствия и наличия пространственной корреляции замираний.

В четвертом разделе представлены результаты комплексной оценки вычислительной сложности известных и новых алгоритмов переключения антенн. Продемонстрирована возможность практического применения новых квазиоптимальных алгоритмов переключения антенн в системах mMIMO. В этом же разделе исследованы характеристики антенных переключателей и даны рекомендации по их оптимальному использованию в определенной полосе частот.

В заключении представлены обобщенные выводы по результатам научного исследования.

В приложениях представлены акты о внедрении и использовании результатов диссертационной работы, и обоснование выбора количества экспериментов.

Научная новизна работы.

Основная ценность научных результатов состоит в разработке новых алгоритмов переключения антенн в системах MIMO, использующих новый более эффективный критерий оптимальности (автовыбора) антенн.

Для целей переключения антенн автором разработан новый критерий оптимальности (автовыбора) в виде минимума следа корреляционной матрицы ошибок демодуляции. Вычислительная сложность нового критерия в 1,5 раза ниже вычислительной сложности известного критерия в виде максимума пропускной способности, а характеристики помехоустойчивости системы MIMO при использовании нового критерия с алгоритмом полного перебора улучшаются до 1 дБ (в исследованных в работе конфигурациях антенн и заданных условиях моделирования).

Автором разработан новый квазиоптимальный алгоритм IZF с низкой вычислительной сложностью, что позволяет использовать этот алгоритм в реальных системах MIMO. Характеристики помехоустойчивости системы при

использовании алгоритма PZF незначительно уступают характеристикам помехоустойчивости лучшего из известных алгоритмов полного перебора с критерием оптимальности в виде максимума пропускной способности.

Автором также продемонстрирована возможность дополнительного упрощения вычисления нового критерия оптимальности.

Практической ценностью работы является разработка новых алгоритмов переключения антенн, применение которых в системе MIMO обеспечивает более высокие по сравнению с известными алгоритмами характеристики помехоустойчивости и приемлемую для практического использования в реальных системах MIMO вычислительную сложность, в том числе и в системах MIMO высоких порядков.

Все результаты работы получены автором лично, **основные результаты** заключаются:

1. в разработанном новом критерии оптимальности в виде минимума следа корреляционной матрицы ошибок оценивания, что позволяет улучшить характеристики помехоустойчивости системы MIMO 0,5 – 1,0 дБ.

2. в более низкой вычислительной сложности нового критерия оптимальности, в 1,5 раза ниже по сравнению с критерием оптимальности в виде максимума пропускной способности.

3. в низкой вычислительной сложности разработанного квазиоптимального алгоритма переключения антенн и незначительных потерях в помехоустойчивости системы при его использовании – до 0,5 дБ.

Замечания по диссертационной работе

1. Нет обоснования выбора схемы помехоустойчивого кодирования – турбокодирование, скорость $\frac{1}{2}$, 4 итерации, длина кадра 573 бита.

2. При моделировании сравнивались характеристики помехоустойчивости систем при разных алгоритмах автовыбора антенн по уровню BER 10^{-3} . На практике в системах мобильной связи для поддержания заданного качества обслуживания требуется обеспечение вероятности битовых ошибок не более BER 10^{-5} .

3. В системах с технологией mMIMO размерность системы, как правило, асимметричная – количество приемопередающих трактов на базовой станции значительно больше числа трактов на абонентской станции, например, 64 x 4 (64 приемопередающих тракта на базовой станции и 4 приемопередающих тракта на абонентской станции). В диссертации рассматривались симметричные системы (10 x 10) или близкие к сбалансированным (8 x 4). Следовало также рассмотреть работу алгоритмов для асимметричных систем, например, 64 x 4.

4. В диссертации рассматривалась система SU-MIMO (Single User MIMO), на практике ввиду асимметричности систем mMIMO используется принцип MU-MIMO (Multi User MIMO). Следовало рассмотреть применение алгоритмов автовыбора антенн в системах MU-MIMO.

Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней.

Диссертация М.Л. Хазова является научно-квалификационной работой. Содержание автореферата соответствует содержанию диссертации. В диссертационной работе решена задача разработки алгоритмов переключения антенн, демонстрирующих лучшие характеристики помехоустойчивости систем MIMO, а также алгоритмов переключения антенн, обладающих приемлемой для практического применения вычислительной сложностью в системах MIMO. Результаты работы М.Л. Хазова могут быть использованы при проектировании и создании систем связи современных и будущих поколений.

Предложенные автором диссертации решения достаточно аргументированы и оценены по сравнению с другими известными решениями. Выносимые на защиту положения в достаточной степени апробированы.

Работа М.Л. Хазова на тему: «Разработка и исследование алгоритмов переключения антенн в системах связи MIMO» соответствует Положению о присуждении ученых степеней, утвержденному постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842. Соискатель заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.15 – «Системы, сети и устройства телекоммуникаций».

Официальный оппонент

Л.А. Варукина

Л.А. Варукина

«13» 12 2023 г.

Сведения об оппоненте:

Варукина Лидия Александровна, Кандидат технических наук, специальность 05.12.13 - «Системы, сети и устройства телекоммуникаций», Директор по продукту ООО «КНС ГРУПП», 123376, г. Москва, ул. Рочдельская 15, стр. 15, <https://yadro.com>.

Телефон: +7 495 540 50 55

Адрес электронной почты: varukina@rambler.ru

Подпись Варукиной Л.А. заверяю:

