

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора технических наук,

Выговтова Константина Анатольевича

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.

Нагрузка на сети связи регулярно растет, что подтверждается более чем десятикратным ростом абонентского трафика за предыдущие десять лет. Количество активных подключений подвижной радиотелефонной связи из года в год продолжает увеличиваться. Пользователи услуг подвижной радиотелефонной связи все чаще приобретают и пользуются «умными» телефонами – смартфонами. Вместе с этим, количество используемых различных устройств для Интернета вещей в России сегодня уже более 70 миллионов. Все эти устройства постоянно либо время от времени устанавливают или поддерживают активное соединение с сетью передачи данных, передают и принимают данные, создавая постоянную дополнительную нагрузку на сеть связи, прежде всего в радиоканале.

Известно, что при современной организации подвижной радиотелефонной связи наиболее востребованным является дефицитный частотный ресурс, увеличение которого приводит к экстенсивному росту возможного объема передаваемых по сети связи данных.

В силу использования частотного ресурса большим количеством гражданских и иных структур, выделение необходимых и самых востребованных для целей организации подвижной радиотелефонной связи частотных диапазонов становится все более затруднительным. В ряд случаев, приходится осуществлять дорогостоящую конверсию части радиочастотного спектра, используемого в иных целях. Конверсия спектра связана с проведением ряда дорогостоящих исследований, организацией производства и поэтапной заменой дорогостоящего оборудования связи.

Вместе с тем, возможен и иной, отличный от экстенсивного расширения, подход, выраженный в повышении эффективности систем связи (спектральной, энергетической). Здесь применяется быстрая адаптация системы к характеристикам беспроводного канала связи, например, оптимально используются различные схемы модуляции или помехоустойчивого кодирования, частотное мультиплексирование, одновременно с этим создаются системы с несколькими антеннами - системы связи ММО (Multiple-Input-Multiple-Output).

Системы связи ММО реализуют свои преимущества, прежде всего благодаря пространственному мультиплексированию и пространственному разнесению антенн, которое реализуется как на передающей, так и на

Вход. № 80/23
« 11 » 12 2023 г.
подпись Эм

приемной сторонах. Помехоустойчивость системы связи ММО растет с увеличением числа антенн, позволяя преодолеть ограничения пропускной способности канала связи SISO, описываемого классической для теории информации теоремой Шеннона-Хартли.

При этом, увеличение количества антенн в классических системах связи ММО приводит к необходимости одновременно увеличивать количество сложных и дорогостоящих радиочастотных трактов, приводит к неоправданному увеличению размеров систем связи, росту энергопотребления и стоимости производства оборудования связи.

Стоимость изготовления и размеры радиочастотных трактов с увеличением количества активных антенн заметно растут. Сохранить основные преимущества и заметно снизить затраты на реализацию многоантенных систем возможно используя принцип переключения (автовыбора) антенн.

В диссертации М.Л. Хазова сформулирована актуальная научная цель, выраженная в разработке алгоритмов переключения (автовыбора) антенн для систем связи ММО, демонстрирующих при их использовании по сравнению с известными алгоритмами более высокие либо сравнимые характеристики помехоустойчивости системы связи и обладающих приемлемой для практического применения вычислительной сложностью.

Краткая характеристика работы.

Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка сокращений и обозначений, списка литературы и двух приложений.

Введение содержит обоснование актуальности темы диссертационной работы, сформулированные цель и научные задачи исследований.

Для достижения цели в работе решается актуальная задача поиска, разработки и исследования нового критерия оптимальности, по которому при работе подходящего для этого критерия одного из алгоритмов осуществляется выбор антенн для их переключения, также решается актуальная задача разработки и исследования новых алгоритмов переключения (автовыбора) антенн с низкой вычислительной сложностью и незначительными энергетическими потерями в сравнении с лучшими алгоритмами.

В **первом разделе** рассматривается математическая модель системы ММО без переключения и с переключением (автовыбором) антенн, изложены существующие алгоритмы переключения антенн, проведен их анализ и обоснование нецелесообразности, а в ряде случаев и невозможности применения этих алгоритмов в системах ММО. Проведен анализ помехоустойчивости известных алгоритмов автовыбора антенн.

Сделан вывод, что наилучшими характеристиками по помехоустойчивости обладает система ММО при использовании алгоритмов полного перебора. Однако использование алгоритма полного перебора

фактически невозможно из-за его высокой вычислительной сложности в системах связи ММО с большим количеством антенн.

Во втором разделе представлен новый критерий оптимальности $tr(\mathbf{R})$ (минимум следа корреляционной матрицы ошибок оценивания) и проведен анализ улучшения характеристик систем ММО при использовании этого критерия в алгоритмах полного перебора, продемонстрирована возможность упрощения вычисления критерия оптимальности и проанализирован эффект от такого упрощения.

В третьем разделе представлены разработанные квазиоптимальные алгоритмы. В условиях отсутствия, а также в условиях наличия пространственной корреляции замираний выполнен анализ характеристик новых квазиоптимальных алгоритмов переключения антенн, использующих новый критерий оптимальности.

В четвертом разделе выполнена оценка вычислительной сложности представленных в работе алгоритмов переключения антенн. Обоснована возможность практического применения алгоритмов переключения антенн в современных системах связи. Проанализированы энергетические потери в антенных переключателях, используемых для создания радиотрактов.

Заключение содержит итоги выполненного диссертационного исследования.

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

Научная новизна работы.

Основная ценность научных результатов состоит в разработке алгоритмов переключения антенн в системах связи ММО, базирующихся на наиболее значимых новых научных результатах диссертационного исследования, свидетельствующих о личном вкладе автора:

- Для целей переключения антенн предложен новый критерий оптимальности, основанный на минимуме следа корреляционной матрицы ошибок демодуляции. При его использовании система связи ММО демонстрирует в исследованных автором конфигурациях и условиях до 1 дБ превосходящие характеристики помехоустойчивости. Значение вычислительной сложности нового критерия оптимальности ниже в 1,5 раза в сравнении с наилучшим из известных критериев оптимальности в виде максимума пропускной способности.

- Разработана упрощенная версия критерия в виде минимума следа корреляционной матрицы ошибок демодуляции с вычислительной сложностью порядка 2,5 раз ниже в сравнении с наилучшим из известных критериев оптимальности в виде максимума пропускной способности.

- На основе нового критерия оптимальности разработан новый эффективный квазиоптимальный алгоритм PZF, обладающий низкой вычислительной сложностью, позволяющей использовать этот алгоритм в реальных системах связи ММО.

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

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

- их достаточной публикацией в 10 научных трудах, в том числе, в 4 работах в рецензируемых научных изданиях, включенных ВАК Российской Федерации в перечень для опубликования материалов диссертаций;

- апробацией на 6 международных и отраслевых научно-технических конференциях, а также их использованием ведущими отраслевыми научно-исследовательскими институтами, что подтверждается актами о внедрении результатов исследования.

Достоверность научных положений и результатов диссертационной работы также подтверждается корректностью постановок задач и применением адекватного математического аппарата для их решения, наличием ясной физической трактовки полученных результатов, их совпадением с известными результатами, полученными для частных условий другими методами, а также непротиворечивостью аналитических результатов и результатов имитационного моделирования.

Теоретическая значимость

- Посредством обоснования связи суммы дисперсий ошибок оценивания для вектора информационных символов с вероятностью ошибки автором обоснован выбор лучшего критерия оптимальности в виде минимума следа корреляционной матрицы ошибок демодуляции. Снижение вероятности ошибки обеспечивает повышение качества и целостности передаваемой информации.

- Автором установлена высокая эффективность применения нового критерия оптимальности с различными алгоритмами переключения антенн по результатам сравнительной оценки характеристик помехоустойчивости системы связи с известными алгоритмами переключения антенн, выполненной методом статистического моделирования. Новый критерий оптимальности и его упрощенные аналоги целесообразно использовать для разработки новых алгоритмов переключения антенн в системах ММО.

Практическая значимость

Разработаны новые алгоритмы переключения антенн, применение которых в системе связи ММО обеспечивает более высокие либо незначительно уступающие известным алгоритмам характеристики помехоустойчивости и демонстрирующие приемлемую для практического использования в реальных многоантенных системах связи ММО вычислительную сложность.

Основные результаты работы.

1. Разработан новый критерий оптимальности в виде минимума следа корреляционной матрицы ошибок оценивания или демодуляции, позволяющий при его использовании с алгоритмом полного перебора (оптимальным алгоритмом) получить в исследованных условиях выигрыш в помехоустойчивости системы связи ММО 0,5 – 1,0 дБ по сравнению с лучшим из известных критериев оптимальности в виде максимума пропускной способности.

2. Обосновано, что 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.

3. Показана низкая вычислительная сложность нового квазиоптимального алгоритма переключения (автовыбора) антенн ПZF, позволяющая применять его в реальных системах связи ММО при незначительных потерях в помехоустойчивости системы связи – до 0,5 дБ в сравнении с лучшим из известных алгоритмов переключения антенн, что обосновано сравнением характеристик помехоустойчивости системы с различными алгоритмами.

При всех заметных положительных результатах диссертационной работы сохраняется актуальность снижения энергетических потерь и снижения вычислительной сложности алгоритмов переключения антенн при сохранении или, что вполне возможно, улучшении характеристик помехоустойчивости системы связи ММО.

Замечания по диссертационной работе.

1. В условиях моделирования содержится утверждение об известности матрицы канала \mathbf{H} на приемной стороне, при этом в работе отсутствует пояснение о возможности такого допущения,
2. Желательно выполнить оценку влияния ошибок оценивания матрицы канала на характеристики помехоустойчивости системы с разработанными алгоритмами, что не влияет на общую положительную оценку полученных результатов.
3. В работе отсутствует моделирование характеристик помехоустойчивости системы ММО с новыми алгоритмами для систем с количеством антенн 64 и более.

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

Диссертационная работа Хазова Михаила Леонидовича является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи, выраженной в разработке алгоритмов переключения (автовыбора) антенн для систем связи ММО, демонстрирующих при их использовании по

сравнению с известными алгоритмами более высокие либо сравнимые характеристики помехоустойчивости системы связи и обладающих приемлемой для практического применения вычислительной сложностью. Результаты работы М.Л. Хазова имеют значение для развития телекоммуникаций, выраженное в возможном снижении затрат на развертывание и эксплуатацию систем связи и повышении устойчивости соединения, воспринимаемого пользователями качества связи.

В работе изложены новые научно обоснованные решения и разработки, Выносимые на защиту положения в достаточно полной степени опубликованы в рецензируемых изданиях и апробированы выступлениями и обсуждениями на научных конференциях.

Работа Хазова Михаила Леонидовича на тему: «Разработка и исследование алгоритмов переключения антенн в системах связи ММО» соответствует Положениям о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842. Соискатель Хазов Михаил Леонидович заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.15 – «Системы, сети и устройства телекоммуникаций».

Официальный оппонент



К.А. Вытовтов

« 5 » 12 2023 г.

Сведения об оппоненте:

Вытовтов Константин Анатольевич, Доктор технических наук, доцент, Ведущий научный сотрудник лаборатории № 69 «Управление сетевыми системами» федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова Российской академии наук, 117997, Москва, ул. Профсоюзная 65, <https://www.ipu.ru/>.

Телефон: +7 495 198-17-20, доб. 1839

Адрес электронной почты: vytovtov_konstan@mail.ru

ПОДПИСЬ

K.A.

ЗАВЕР

ВЕД. ИНЖЕНЕР

ЗАЛОЖИНА И.И.

