

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 55.2.002.01
НА БАЗЕ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ «МОСКОВСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
СВЯЗИ И ИНФОРМАТИКИ»
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ
КАНДИДАТА НАУК**

аттестационное дело N _____

**Решение диссертационного совета от 31.01.2024 г. N 114
о присуждении гражданину Российской Федерации Хазову Михаилу
Леонидовичу ученой степени кандидата технических наук.**

Диссертация «Разработка и исследование алгоритмов переключения антенн в системах связи ММО» по специальности 2.2.15 – «Системы, сети и устройства телекоммуникаций» принята к защите 21 ноября 2023 г., протокол № 110, диссертационным советом 55.2.002.01 на базе ордена Трудового Красного Знамени федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский технический университет связи и информатики» (далее МТУСИ), Министерство цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации, 111024, г. Москва, ул. Авиамоторная, 8а, Приказ Министерства образования и науки Российской Федерации № 244/нк от 03.03.2016, изменения в составе утверждены Приказами Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 37/нк от 30.01.2019, № 599/нк от 15.10.2020, №804/нк от 16.12.2020, № 331/нк от 12.04.2021, № 679/нк от 24.06.2022, № 1215/нк от 12.10.2022.

Соискатель Хазов Михаил Леонидович 21 мая 1976 года рождения, в 1998 г. окончил Санкт-Петербургский государственный

электротехнический университет им. В. И. Ульянова (Ленина) инженером по специальности «Электронные приборы и устройства». Диплом № АВС 0980395, регистрационный номер: 898. Кандидатские экзамены сданы в 2019 году (имеется *справка* о сдаче экзаменов). Работает в ПАО «МегаФон» руководителем направления.

Диссертация выполнена на кафедре «Информационная безопасность» МТУСИ.

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор Крейнделин Виталий Борисович работает в ордена Трудового Красного Знамени федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский технический университет связи и информатики» (МТУСИ) на кафедре «Информационная безопасность» в должности профессора.

Официальные оппоненты:

1) 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;

2) Варукина Лидия Александровна, кандидат технических наук, специальность 05.12.13 - «Системы, сети и устройства телекоммуникаций», Директор по продукту ООО «КНС-Групп»

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное учреждение «Ордена Трудового Красного Знамени Российский научно-исследовательский институт радио имени М.И. Кривошеева» (далее ФГБУ НИИР), г. Москва, в своем положительном заключении, подписанном Захаровым Алексеем Алексеевичем, кандидатом технических наук, доцентом, заместителем генерального директора ФГБУ НИИР по науке,

указала, что сформулированная в диссертации научная задача является актуальной. Решение указанной задачи позволит повысить энергетическую эффективность системы связи, что может быть выражено в увеличении пропускной способности канала связи в условиях многолучевой среды распространения радиоволн без увеличения занимаемой полосы частот или мощности передатчика, либо привести к сокращению количества базовых станций для покрытия территорий фиксированной площади. Разработанные М. Л. Хазовым критерий оптимальности и алгоритмы переключения антенн могут быть применены в приемопередающих устройствах систем связи ММО, в том числе высоких порядков. Соискатель имеет по теме диссертации 10 работ, из них 4 – работы, опубликованные в рецензируемых научных изданиях, рекомендуемых ВАК, и 6 публикаций в других индексируемых научных журналах и изданиях.

Основные публикации:

1. Крейнделин, В. Б. Алгоритмы переключения антенн в системах ММО / В. Б. Крейнделин, М. Л. Хазов. // Электросвязь. – 2017. – № 10. – С. 59-64 (личный вклад М. Л. Хазова: 70%);
2. Бакулин, М. Г. Критерии автовыбора антенн в системах ММО / М.Г. Бакулин, В. Б. Крейнделин, М. Л. Хазов // Электросвязь. – 2018. – № 10. – С. 72-75 (личный вклад М. Л. Хазова: 60%);
3. Крейнделин, В. Б. Исследование преимуществ автовыбора антенн в системах ММО в сравнении с базовой системой ММО без автовыбора антенн / В. Б. Крейнделин, М. Л. Хазов. // Цифровая обработка сигналов. – 2018. – № 4. – С. 63-68 (личный вклад М. Л. Хазова: 70%);
4. Хазов, М. Л. Сравнение систем ММО, с автовыбором антенн и без автовыбора антенн / М. Л. Хазов. Материалы XIII международной отраслевой научно-технической конференции «Технологии

информационного общества» / М.: МТУСИ. – 20-21 марта 2019 г. – С. 131-134 (личный вклад М. Л. Хазова: 100%);

5. Крейнделин, В. Б. Упрощенные алгоритмы переключения антенн в системах связи ММО / В. Б. Крейнделин, М. Л. Хазов. // Труды международной научно-технической конференции «Телекоммуникационные и вычислительные системы 2022» / М.: МТУСИ. – 12-15 декабря 2022 г. – С. 307-313 (личный вклад М. Л. Хазова: 80%);

6. Bakulin M. G., Kreyndelin V. B., Khazov M. L. (2023). New quasi-optimal algorithms of antenna selection with low complexity, 2023, T-Comm, vol.17, no.7, pp. 47-56 (in English) (личный вклад М. Л. Хазова: 70%).

Недостовверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации, отсутствуют. В части разработки и исследования алгоритмов переключения антенн, обеспечивающих лучшие характеристики помехоустойчивости системы связи ММО, диссертантом внесен основной вклад в опубликованные научные труды. Результаты диссертационной работы получены ее автором самостоятельно, из публикаций с соавторами в диссертацию включены только личные результаты автора. Автор также обобщил результаты исследований и сформулировал основные выводы. Вклад соавторов ограничивался обсуждением полученных результатов по результатам проработки лично автором совместно поставленных задач.

На диссертацию и автореферат поступило 12 положительных отзывов от ФГБУ «Ордена Трудового Красного Знамени Российской научно-исследовательского института радио имени М. И. Кривошеева», оппонента Вытовтова Константина Анатольевича, оппонента Варукиной Лидии Александровны, Международной общественной академии связи, АНО Научно-технического центра информатики, АО Научно-технического центра «Атлас», ПАО «Гипросвязь», ООО «Омега» (Омега инжиниринг),

ООО Научно-технического центра «Комтест», АО «НПК Криптонит», ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича», Санкт-Петербургского (Северо-западного) отделения общероссийской общественной организации «Академия инженерных наук имени А. М. Прохорова».

Были отмечены следующие основные не влияющие на общую положительную оценку полученных результатов недостатки:

1. Вычислительная сложность оптимального алгоритма с упрощенной версией критерия оптимальности является все еще высокой, что затрудняет использование этой комбинации алгоритма и критерия в системах связи ММО сверхвысоких порядков;
2. В работе не рассмотрено влияние ошибок оценивания матрицы канала на характеристики разработанных алгоритмов;
3. В работе отсутствуют предложения о включении результатов разработки и исследований предложенных решений в стандарты;
4. В условиях моделирования содержится утверждение об известности матрицы канала \mathbf{H} на приемной стороне, при этом в работе отсутствует пояснение о возможности такого допущения;
5. В работе отсутствует моделирование характеристик помехоустойчивости системы ММО с новыми алгоритмами для систем с количеством антенн 64 и более;
6. В диссертации рассматривалась система SU-MIMO, на практике ввиду асимметричности систем mMIMO при ограниченном числе приемопередающих трактов на абонентской станции, используется принцип MU-MIMO. Следовало рассмотреть применение алгоритмов автовыбора антенн в системах MU-MIMO;

7. Отсутствует оценка эффекта от использования новых алгоритмов, выраженного в сокращении требуемого количества базовых станций при радиопланировании в различных условиях;

8. Имитационное моделирование выполнялось при одних и тех же базовых условиях: метод модуляции – 64-QAM, демодуляции – MMSE; вид помехоустойчивого кодирования - турбокодирование (скорость – 1/2, число итераций декодирования – 4), длина кадра – 573 бита;

9. Отсутствует оценка сложности аппаратной реализации исследуемых алгоритмов в части массогабаритных параметров и параметров энергопотребления приемо-передающих систем связи MIMO;

10. Оценка энергетического выигрыша для новых алгоритмов, выполненная в условиях наличия пространственной корреляции замираний на основе модели Кронекера, осуществлялась при достаточно высоких значениях коэффициента $BER = 10^{-3}$.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается тем, что официальные оппоненты и представители ведущей организации имеют значительное количество публикаций, близких к теме диссертационного исследования.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

- в диссертационной работе обосновано, что при росте количества антенн возможно сохранить преимущества классических систем MIMO применив принцип переключения (автовыбора) антенн;
- сделан обоснованный вывод, что системах MIMO с большим количеством антенн нецелесообразна, а в ряде случаев невозможна реализация известных алгоритмов переключения антенн ввиду их высокой вычислительной сложности или низкой помехоустойчивости системы;
- решена задача разработки нового критерия оптимальности для целей переключения (автовыбора) антенн в виде минимума следа

корреляционной матрицы ошибок демодуляции, использование которого дает заметный выигрыш в помехоустойчивости системы и повышает качество работы самого алгоритма выбора антенн;

– система связи ММО с новым оптимальным алгоритмом полного перебора с новым критерием оптимальности в виде минимума следа корреляционной матрицы ошибок демодуляции демонстрирует более высокие результаты помехоустойчивости в сравнении с оптимальным алгоритмом полного перебора с лучшим из известных критериев оптимальности в виде максимума пропускной способности независимо от антенной конфигурации и значений коэффициентов ошибок BER , FER ; выигрыш в помехоустойчивости системы при значении $BER = 10^{-3}$ составляет до 0,75 дБ в отсутствие пространственных корреляций замираний для конфигурации ММО, характеристики помехоустойчивости при использовании нового критерия оптимальности улучшаются с ростом количества активных и пассивных антенн, относительный выигрыш от использования нового критерия оптимальности также растет с усилением корреляционных связей и при более низких значениях BER , выигрыш в помехоустойчивости системы увеличивается до 1 дБ при более низких значениях $BER = 10^{-4}$;

– алгоритм полного перебора с новым критерием оптимальности в виде минимума следа корреляционной матрицы ошибок демодуляции демонстрирует при значении $BER = 10^{-3}$ выигрыш в 0,8 дБ в условиях наличия пространственных корреляций замираний для ММО более низкой размерности 4×8 при значениях корреляционных коэффициентов $\pm 0,6$;

– решена задача снижения вычислительной сложности алгоритмов автовыбора антенн в системе связи ММО, в том числе в ММО с большим количеством антенн;

– новый оптимальный алгоритм полного перебора с новым критерием оптимальности является в 1,5 раза менее сложным в реализации в сравнении с лучшим из известных оптимальных алгоритмов полного перебора с критерием оптимальности в виде максимума пропускной способности, в то же время найден способ для упрощения вычисления нового критерия оптимальности и снижения его вычислительной сложности ~ в 2,5 раза;

– характеристики помехоустойчивости системы связи ММО с разработанным новым алгоритмом неполного перебора ПZF и новым критерием оптимальности сопоставимы с характеристиками лучших оптимальных алгоритмов полного перебора с известными критериями оптимальности. Система связи ММО с алгоритмом ПZF демонстрирует потери 0,2 – 0,5 дБ в сравнении с лучшими алгоритмами автовыбора антенн, при этом алгоритм ПZF обладает до двух – трех порядков более низкой вычислительной сложностью.

– алгоритм неполного перебора ПZF с новым критерием оптимальности можно реализовать в реальных системах связи ММО, что обосновано оценкой времени, затрачиваемого современным микропроцессором на его реализацию, а также подсчетом примерного времени, требуемого для переключения антенн, в том числе при использовании микропроцессоров отечественной архитектуры.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

– посредством обоснования для вектора информационных символов связи суммы дисперсий ошибок оценивания с вероятностью ошибки аргументирован выбор лучшего критерия оптимальности в виде минимума следа корреляционной матрицы ошибок демодуляции; снижение вероятности ошибки обеспечивает повышение качества и целостности передаваемой информации;

– 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.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

– применение в системах связи ММО разработанных новых алгоритмов переключения антенн обеспечивает более высокие по сравнению с известными алгоритмами характеристики помехоустойчивости и приемлемую для практического использования в реальных многоантенных системах связи ММО вычислительную сложность, в том числе в системах ММО высоких порядков и с использованием отечественных микропроцессоров;

– результаты диссертационной работы в части разработки новых алгоритмов переключения антенн в системах связи ММО на приемной и передающей сторонах были использованы Санкт-Петербургским филиалом «Ленинградское отделение научно-исследовательского института радио» федерального государственного бюджетного учреждения «Ордена Трудового Красного Знамени Российский научно-исследовательский институт радио имени М.И. Кривошеева» в целях радиочастотного планирования сетей беспроводного доступа, в том числе в целях сокращения количества базовых станций для покрытия территорий фиксированной площади, что подтверждено соответствующим актом о внедрении;

– результаты в части исследования существующих и новых алгоритмов переключения антенн в системах связи ММО были использованы в разработках Российского научно-исследовательского института радио имени М.И. Кривошеева (ФГБУ НИИ Радио) в целях

реализации автовыбора антенн и показали свою эффективность, позволив увеличить пропускную способность канала связи в условиях многолучевой среды распространения радиоволн без увеличения занимаемой полосы частот или мощности передатчика, что подтверждено соответствующим актом.

Достоверность результатов диссертационной работы обеспечивается согласованностью результатов теоретического анализа и имитационного моделирования, обеспечивающим требуемую точность выбранным количеством экспериментов при моделировании, актами о внедрении результатов и обсуждалась со специалистами, в том числе на научных конференциях.

Личный вклад соискателя:

– в части разработки и исследования алгоритмов переключения антенн, обеспечивающих лучшие характеристики помехоустойчивости системы связи ММО, диссертантом внесен основной вклад в опубликованные научные труды, вклад соавторов ограничивался обсуждением полученных результатов по результатам проработки лично автором совместно поставленных задач;

– результаты диссертационной работы получены автором самостоятельно, из публикаций с соавторами в диссертацию включены только личные результаты автора;

– диссертантом разработаны квазиоптимальные алгоритмы с приемлемой для их практического использования вычислительной сложностью;

– автор диссертации также обобщил результаты исследований и сформулировал основные выводы.

Диссертация Хазова Михаила Леонидовича является научно-квалификационной работой, содержащей решение актуальной научной задачи – разработки 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.

Цель диссертационного исследования достигнута, поставленные задачи решены.

По новизне, уровню научной проработки и практической значимости полученных результатов работа отвечает требованиям п. 9 и 10 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, а ее автор Хазов Михаил Леонидович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.15 – «Системы, сети и устройства телекоммуникаций».

На заседании «31» января 2024 г. диссертационный совет принял решение присудить Хазову Михаилу Леонидовичу ученую степень кандидата технических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 14 человек, из них 6 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 20 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за -14, против -нет, недействительных бюллетеней -нет.

Председатель
диссертационного совета

А.С. Аджемов

Ученый секретарь
диссертационного совета

М.В. Терешонок

Заключение совета составлено «31» января 2024 г.