



МИНИСТЕРСТВО  
ЦИФРОВОГО РАЗВИТИЯ, СВЯЗИ  
И МАССОВЫХ КОММУНИКАЦИЙ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
«Ордена Трудового Красного Знамени  
Российский научно-исследовательский  
институт радио имени М.И. Кривошеева»  
(ФГБУ НИИР)

Почтовый адрес: Казакова ул., д. 16, Москва, 105064

Телефон: (495) 647-17-77, факс: (499) 261-00-90

E-mail: [info@niir.ru](mailto:info@niir.ru), <http://www.niir.ru>

ОКПО 56622156, ОГРН 1227700388827

ИНН/КПП 9709082715/770901001

«УТВЕРЖДАЮ»

Заместитель генерального директора  
ФГБУ НИИР по науке,  
кандидат технических наук, доцент



А.А. Захаров

2023 г.

## ОТЗЫВ

ведущей организации – Федерального государственного бюджетного учреждения «Ордена Трудового Красного Знамени Российский научно-исследовательский институт радио имени М.И. Кривошеева» 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».

### 1. Актуальность темы исследования

15 августа 2023 года на сайте Минцифры России в сети «Интернет» был опубликован документ «Проект стратегии развития отрасли связи Российской Федерации на период до 2035 года» (далее – Стратегия развития связи). Адрес размещения публикации: <https://digital.gov.ru/ru/documents/?type=25>.

Стратегия развития связи содержит оценку состояния отрасли связи Российской Федерации и глобальные тренды развития отрасли связи, в соответствии с которой на сегодняшний день в мире активно внедряются новые цифровые сервисы как для массового и корпоративного секторов, так и для государственных потребителей. Это приводит к развитию инфраструктуры связи как по параметрам скорости передачи данных, задержки сигнала и надёжности доставки информации, так и по покрытию доступом к современным услугам связи ранее не охваченных территорий.

За 2012-2022 годы объём интернет-трафика в Российской Федерации вырос более чем в 11 раз – с 11,1 до 123,7 Эбайт (рост в среднем на 27% в год).

Вход. № 92/23  
«21» 12 2023г.  
ПОДПИСЬ

По итогам 2022 года количество абонентов фиксированного ШПД в России составило 35,7 млн (в том числе 2 млн юридических лиц). Прирост абонентской базы с 2017 года находится на уровне 2-3% ежегодно. Число абонентов подвижной радиотелефонной связи (далее – мобильная связь) (активных SIM-карт) составило до 256 млн, проникновение сетей мобильной связи – 175% (159% в 2021 году). Спутниковая связь задействована в работе по устранению цифрового неравенства: к Интернету с её использованием подключено более 3 тыс. населенных пунктов, обеспечивается связью весь маршрут Северного морского пути и 400 российских морских рыбооловецких судов. К началу 2023 года общее количество подключенных устройств Интернета вещей в России достигло 70,1 млн единиц (без учета носимых устройств), отраслями-лидерами по внедрению технологий Интернета вещей в России являются: энергетика/ЖКХ (30%), строительство (18%), транспорт (16%). Бурное развитие ИТ-сектора и модернизацию финансовой сферы (мобильный банкинг, брокерское обслуживание в смартфоне, онлайн-платежи и проч.) также невозможно представить без надежной и качественной связи.

Отрасль связи не только выдержала скачкообразный рост объема передаваемых данных, но и гибко адаптировалась к новым реалиям. Пользователи сети чувствительно относятся даже к кратковременному снижению качества обслуживания, поэтому необходимо постоянно поддерживать высокий уровень качества предоставляемых услуг.

В соответствии с обсуждаемой Стратегией развития связи в текущих условиях необходимо укрепить технологический суверенитет России, отрасль связи должна обеспечить гарантированный спрос на отечественную высокотехнологичную продукцию, осуществить поэтапный переход на российское оборудование и программное обеспечение, сохранив при этом высокий уровень качества предоставляемых услуг, в том числе через поддержание темпа освоения новых поколений технологий связи.

Тенденции развития и внедрения цифровых сервисов позволяют сделать прогноз о дальнейшем увеличении глобального объема интернет-трафика не менее чем на 30% в год, что приведет к его росту в 30 раз к 2035 году по сравнению с 2022 годом.

Системы связи поколений 4G/5G/6G предполагают использование систем с несколькими антеннами на приемной и передающей сторонах - MIMO (Multiple-Input-Multiple-Output), которые позволяют получить заметный энергетический выигрыш и улучшить спектральную эффективность систем связи. Однако, сложность реализации системы и стоимость изготовления радиочастотных трактов заметно растет с увеличением количества активных антенн. Существенно снизить эти затраты при

сохранении основных преимуществ многоантенных систем возможно, применяя подход, известный как переключение (автовыбор) антенн. Ограниченному числу радиочастотных трактов могут быть оптимально назначены приемные и/или передающие антенны. При этом используются антенные переключатели с потерями порядка 1,0 дБ. В то же время, помехоустойчивость системы связи ММО растет как с увеличением числа активных антенн (радиотрактов), так и с увеличением общего числа антенн (пассивных антенн).

Для целей дальнейшего развития систем связи и достижения высоких показателей эффективности систем связи ММО появилась необходимость исследовать принцип и развивать подходы к переключению (автовыбору) антенн в условиях наличия различного рода шумов, помех, искажений и замираний в канале связи.

Таким образом, сформулированная в диссертации научная проблема является актуальной. Решение указанной проблемы 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.

Основное внимание в работе уделено решению следующих задач:

- Анализ характеристик известных алгоритмов переключения (автовыбора) антенн.
- Поиск, разработка и исследование нового критерия оптимальности для переключения (автовыбора) антенн.
- Разработка и исследование новых алгоритмов переключения (автовыбора) антенн с низкой вычислительной сложностью и незначительными энергетическими потерями в сравнении с лучшими алгоритмами.

## **2. Структура и основные результаты работы**

Диссертация содержит введение, четыре раздела, заключение, список сокращений, список литературы, два приложения, 126 страниц текста, иллюстрируется 40 рисунками и 9 таблицами. Список литературы состоит из 114 наименований.

Во **введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель и основные направления исследований.

В **первом разделе** рассматривается математическая модель системы ММО без переключения и с переключением (автовыбором) антенн, изложены существующие алгоритмы переключения антенн, проведен анализ

помехоустойчивости системы ММО с известными алгоритмами автовыбора антенн, обоснована нецелесообразность, а в ряде случаев и невозможность применения этих алгоритмов в системах ММО.

**Во втором разделе** представлен новый критерий оптимальности в виде минимума следа корреляционной матрицы ошибок оценивания и проведен анализ улучшения характеристик систем ММО при использовании этого критерия в алгоритмах полного перебора при условии отсутствия пространственной корреляции замираний. Наглядно продемонстрировано, что при использовании в качестве критерия оптимальности минимума следа корреляционной матрицы ошибок оценивания достигаются наилучшие характеристики помехоустойчивости системы ММО при более низкой вычислительной сложности, чем в случае использования в качестве критерия оптимальности критерия оптимальности в виде максимума пропускной способности.

В этом разделе также продемонстрирована возможность упрощения вычисления самого критерия оптимальности и проанализирован эффект от такого упрощения. Результаты, полученные с помощью нового критерия оптимальности, подтверждены имитационным моделированием.

**Третий раздел** посвящен разработке и анализу в условиях отсутствия и наличия пространственной корреляции замираний новых алгоритмов переключения антенн в системах связи ММО на основе нового критерия оптимальности. Разработаны новые квазиоптимальные алгоритмы переключения антенн, использующие новый критерий оптимальности. Выполнена сравнительная оценка помехоустойчивости систем ММО при использовании известных оптимальных, оптимального алгоритма с новым критерием и новых упрощенных алгоритмов с новым критерием оптимальности. Результаты подтверждены имитационным моделированием.

**Четвертый** раздел содержит комплексную оценку вычислительной сложности всех представленных в работе алгоритмов переключения антенн. Также в нем обоснована возможность практического применения алгоритмов переключения антенн в современных системах связи. В дополнение, в этом разделе проанализированы величины энергетических потерь и их влияние на помехоустойчивость системы ММО в антенных переключателях, используемых для формирования радиотрактов.

**В заключении** сформулированы основные научные и практические результаты диссертационной работы.

**В приложениях** к работе представлены акты о внедрении и использовании результатов диссертационной работы и обоснован выбор количества экспериментов при моделировании.

### **3. Научная новизна работы**

– Для целей переключения антенн предложен и исследован вместе с алгоритмом полного перебора новый критерий оптимальности, основанный на минимуме следа корреляционной матрицы ошибок демодуляции. При его использовании система связи ММО демонстрирует в исследованных 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.

– Разработаны новые квазиоптимальные алгоритмы, пошагово увеличивающие (ИЗФ) или пошагово уменьшающие (ИДФ) размерность формируемой матрицы канала, незначительно (до 0,5 дБ для ИЗФ и до 1,2 дБ для ИДФ) уступающие в помехоустойчивости оптимальному алгоритму с лучшим из известных критериев оптимальности в виде максимума пропускной способности, при этом обладающие значительно более низкой вычислительной сложностью. Низкая вычислительная сложность квазиоптимального алгоритма ИЗФ позволяет использовать его в реальных системах связи ММО с современными процессорами, включая отечественные образцы.

### **4. Практическая значимость диссертационной работы**

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

Научные и практические результаты, полученные М.Л. Хазовым имеют практическую ценность для решения прикладных задач проектирования и строительства современных и перспективных систем связи. Практическая ценность диссертации подтверждается использованием и внедрением её результатов ФГУП «НИИР», ФГУП НИИР – «ЛОНИИР» соответствующими актами внедрения.

### **5. Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций**

Результаты диссертационной работы достоверны, что подтверждается согласованностью результатов теоретического анализа и имитационного

моделирования. Достоверность результатов также подтверждается актами об их внедрении. Полученные результаты опубликованы и обсуждались со специалистами, в том числе на научных конференциях.

#### **6. Личный вклад автора**

Результаты диссертационной работы и положения, выносимые на защиту и составляющие основное содержание работы, разработаны и получены автором лично. В опубликованные научные труды диссертантом внесен основной вклад в части разработки и исследования нового критерия оптимальности, разработки и исследования алгоритмов переключения антенн с лучшими характеристиками помехоустойчивости, разработаны квазиоптимальные алгоритмы с приемлемой для их практического использования вычислительной сложностью. Вклад соавторов научных трудов ограничивался постановкой задач и обсуждением результатов.

#### **7. Соответствие работы паспорту научной специальности**

Тема и содержание диссертационной работы соответствуют в части пункта 15 паспорта научной специальности 2.2.15 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций.

#### **8. Апробация результатов работы**

Полученные результаты опубликованы и обсуждались со специалистами на научных конференциях, подготовлено 6 докладов. Основные результаты диссертационные работы отражены в 4 работах в изданиях, включенных в перечень ВАК.

#### **9. Рекомендации по использованию результатов диссертации**

Разработанные М.Л. Хазовым критерий оптимальности и алгоритмы переключения антенн могут быть применены в приемопередающих устройствах систем связи ММО, в том числе высоких порядков.

#### **10. Замечания по диссертационной работе**

К замечаниям по результатам диссертационной работы следует отнести следующее:

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.

Указанные недостатки не снижают значимость полученных результатов и не влияют на общую положительную оценку работы, защищаемые положения которой обладают научной новизной и практической значимостью.

### 11. Заключение

Диссертационная работа М.Л. Хазова является законченной научной квалификационной работой, выполненной автором самостоятельно на актуальную тему и на достаточном научном уровне. По новизне, уровню научной проработки и практической значимости полученных результатов работа отвечает требованиям п. 9 Постановления Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 «Положение о присуждении учёных степеней», а её автор, Хазов Михаил Леонидович, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.15 - «Системы, сети и устройства телекоммуникаций».

Отзыв подготовила:

Иванкович Мария Владимировна, кандидат технических наук, 05.12.13 - «Системы, сети и устройства телекоммуникаций», заместитель директора Цента исследования перспективных беспроводных технологий связи, Федеральное государственное унитарное предприятие «Ордена Трудового Красного Знамени Российский научно-исследовательский институт радио имени М.И. Кривошеева» (ФГУП НИИР), Россия, 105064, Россия, г. Москва, ул. Казакова, 16, Тел.: +7 (495) 647-17-77, доб. 2651, e-mail: m.ivankovich@niir.ru.

Диссертация, автореферат и отзыв на диссертацию обсуждены на заседании секции научно-технического совета НТЦ Анализа электромагнитной совместимости ФГУП НИИР 19.12.2023, протокол № 035/23/12/02.

Заместитель директора ЦИ ПБТС, к.т.н.



М.В. Иванкович

Подпись М.В. Иванкович заверяю  
Директор службы персонала ФГУП НИИР



«19» декабря 2023 г.

В.А. Тютюнова

«02» декабря 2023

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Ордена Трудового Красного Знамени Российский научно-исследовательский институт радио имени М.И. Кривошечева» (ФГБУ НИИР).

Адрес: 105064, Россия, г. Москва, ул. Казакова, 16.

Веб-сайт: <http://niir.ru/>.

Тел.: (495) 647-18-30 Факс: (499) 261-00-90.

Адрес электронной почты: [info@niir.ru](mailto:info@niir.ru).