



ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО СВЯЗИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
«Ордена Трудового Красного Знамени
Российский научно-исследовательский
институт радио имени М.И. Кривошеева»
(ФГУП НИИР)

Казакова ул., д. 16, Москва, 105064
Телефон: (495) 647-18-30, для справок: (499) 261-63-70,
Факс: (499) 261-00-90, E-mail: info@niir.ru
<http://www.niir.ru>
ОКПО 01181481, ОГРН 1027700120766
ИНН/КПП 7709025230/770901001

№ _____
На № _____ от _____

УТВЕРЖДАЮ

Исполняющий обязанности
Генерального директора
ФГУП НИИР



М.Ю. Сподобаев

09 2020 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации - Федерального государственного унитарного предприятия «Ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский институт радио имени М.И. Кривошеева» на диссертацию Резнева Андрея Алексеевича «Исследование и разработка алгоритмов пространственно-временного кодирования для систем связи с несколькими передающими и несколькими приемными антеннами», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.13 - «Системы, сети и устройства телекоммуникаций».

1. Актуальность темы исследования

Анализ роста трафика современных мобильных радиосистем выявляет две основные тенденции:

- увеличение к настоящему времени числа мобильных подключений до 12,3 миллиардов, из которых 8,5 миллиардов приходится на персональные мобильные устройства, остальное приходится на межмашинные соединения;

- рост скорости передачи данных: с 8,7 Мбит/с в 2017 г. до 28,5 Мбит/с в 2022 г.

С 2017 по 2022 год прогнозируемый операторами рост объемов используемых данных для передачи мобильного видео составит 9 раз и составит приблизительно 79% мирового мобильного трафика. Для удовлетворения растущей потребности пользователей в беспроводных услугах по передаче изображений операторы связи внедряют технологии группы стандартов 4G и 5G, которые заменяют или дополняют стандарты 2G и 3G. По результатам прогноза Cisco к 2022 году более 54% всех соединений будут приходиться на сети 4G, через которые будет передаваться более 71% всего мобильного трафика данных, 11,8% мобильного трафика будет передаваться через сети 5G, при этом одно устройство, подключенное к сети 5G, будет создавать в 2,6 раз больше трафика, чем устройство, подключенное к сети 4G.

Технологии мобильной связи групп 4G/5G предполагают использование систем множественных передачи и приема с несколькими антеннами на приемной и передающей сторонах - MIMO (Multiple-Input-Multiple-Output), обеспечивающих существенный энергетический выигрыш и улучшение спектральной эффективности систем мобильной связи.

Вход. № 40/20
«08» 09 2020
подпись

Для обеспечения высоких показателей эффективности систем связи MIMO появилась необходимость разработки методов пространственно-временного кодирования, применение которых позволяет обеспечить достижение разумного компромисса между помехоустойчивостью и спектральной эффективностью.

Пространственно-временное кодирование использует два класса кодов – ортогонального и неортогонального типа. В настоящее время область эффективного применения ортогональных кодов ограничена системами с двумя передающими и двумя приемными антеннами.

Однако перспективные системы 5G предлагают к стандартизации и использованию технологии масштабного MIMO - Large Scale MIMO (Large Scale Multiple-Input Multiple-Output), с количеством антенн до 128. Таким образом, развитие получают системы с неортогональным или квазиортогональным пространственным кодированием. Известным способом такого кодирования является пространственное кодирование типа BLAST, соответственно которому за один такт передается количество символов, равное числу передающих антенн. Однако данный код недостаточно эффективен для применения в современных системах мобильной связи.

К создаваемым вновь алгоритмам пространственно-временного кодирования, предъявляются противоречащие друг другу требования:

- обеспечение высокой спектральной эффективности системы связи MIMO;
- обеспечение высокой помехоустойчивости системы связи MIMO;
- приемлемая для практической реализации вычислительная сложность алгоритма демодуляции.

В свете приведенных обстоятельств задача синтеза квазиортогональных пространственно-временных кодов, наилучшим образом подходящих (оптимальных) для применения в конкретных системах связи, представляется весьма актуальной.

2. Цель работы

Работа посвящена разработке и исследованию пространственно-временных матриц для систем MIMO, в том числе большой размерности, с характеристиками помехоустойчивости, превышающими характеристики систем MIMO, использующих известные пространственно-временные матрицы.

3. Структура и основные результаты работы

Диссертация содержит 132 страницы текста, иллюстрируется 42 рисунками и 23 таблицами и состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений, списка литературы и одного приложения. Автореферат диссертации содержит 23 страницы.

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

В **первой главе** рассматриваются основные предпосылки для использования множественных систем связи MIMO, а также использование пространственно-временного кодирования для передачи информации в таких системах. Проведен анализ существующих порождающих матриц и способы формирования кодов большой размерности. Рассмотрен вопрос виртуализации множественной системы и ее приведение к типу BLAST. Описаны способы исследования порождающих матриц на основе известных критериев оптимальности.

Во **второй главе** разработаны пространственно-временные коды большой размерности на базе матриц Голден и матрицы с поворотом сигнального созвездия. Проведена виртуализация для матриц Голден размерности 2×2 и матрицы с поворотом сигнального созвездия размерности 4×4 , получены эквивалентные виртуальные матрицы каналов. Поставлена задача разработки аналитического способа формирования эквивалентной виртуальной матрицы канала EVCM (Equivalent Virtual Channel Matrix) и представлено несколько способов получения таких матриц, в том числе обобщенный. Работоспособность разработанного аналитического способа подтверждена примерами его использования для известных порождающих матриц.

Показано, что коды соответствующие матрицам Голден обладают значительными преимуществами перед распространенными кодами типа BLAST. Заложенные в разработанном коде свойства, связанные с передачей комбинации символов за два временных такта, через две передающие антенны, позволяют формировать пространственно-временной код большой размерности с сохранением преимущества перед другими кодами.

Третья глава посвящена исследованиям оптимальности пространственно-временных кодов с использованием нового критерия минимизации дисперсии ошибки демодуляции. Исследованы закономерности в структурах матриц для выявления принципов формирования указанного критерия. Сформулирован критерий для матрицы EVCM и на его основе получены характеристики соответствующего оптимального кода. Полученный критерий применен к известным матрицам Голден 2×2 , с поворотом сигнального созвездия 4×4 , а также к вновь синтезированным кодам большой размерности. Результаты, полученные с помощью критерия, подтверждены имитационным моделированием.

Четвертая глава затрагивает вопросы применимости вновь полученного критерия по сравнению с известными детерминантным и ранговым критериями в свете вычислительной сложности. Рассчитана сравнительная вычислительная сложность алгоритмов, соответствующих различным критериям при использовании сигналов с разными параметрами модуляции, а также оценены практические возможности вычислений при использовании различных процессоров. Подтверждена допустимая вычислительная сложность алгоритма, соответствующего предложенному критерию.

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

4. Научная новизна работы

По итогам диссертационной работы:

1. Разработаны неортогональные пространственно-временные коды большой размерности с помехоустойчивостью, превосходящей помехоустойчивость известных кодов.
2. Разработан новый критерий оптимальности, подходящий для пространственно-временных матриц большой размерности, который позволяет выполнить параметрическую оптимизацию матрицы пространственно-временного кодирования с целью достижения максимальной помехоустойчивости.
3. Разработан метод аналитического синтеза эквивалентной виртуальной матрицы канала для пространственно-временных матриц любой размерности.

4. Практическая значимость диссертационной работы

Научные и практические результаты, полученные А.А. Резневым имеют практическую ценность для решения прикладных задач для исследования и оптимизации систем связи ММО больших размерностей. Практическая ценность диссертации подтверждается использованием и внедрением её результатов ФГУП «НИИР», ФГУП «РНИИРС», ФГАНУ «ЦНИИ РТК», что подтверждается соответствующими актами внедрения.

5. Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций

Достоверность полученных результатов подтверждается применением известных методов исследования, результатами, полученными с помощью теоретических выкладок, корректностью методик имитационного моделирования. Полученные результаты опубликованы и обсуждались со специалистами 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.

7. Соответствие работы паспорту научной специальности

Тема и содержание диссертационной работы соответствуют пункту 8 паспорта научной специальности 05.12.13 – «Системы, сети и устройства телекоммуникаций».

8. Апробация результатов работы

Полученные результаты опубликованы в научных изданиях и обсуждались на научных конференциях, подготовлено 10 докладов. Основные результаты диссертационной работы отражены в 5 статьях, опубликованных в изданиях, включенных в Перечень ВАК.

9. Рекомендации по использованию результатов диссертации

Разработанные А.А. Резневым пространственно-временные коды могут быть применены в приемопередающих устройствах систем связи ММО произвольной размерности.

10. Замечания по диссертационной работе

К замечаниям по результатам диссертационной работы следует отнести следующее:

- в работе не рассмотрены перспективы реализации разработанных алгоритмов с помощью аппаратных средств;
- в работе не рассмотрен практический выигрыш от использования предложенных порождающих матриц в конкретных системах связи;
- результаты имитационного моделирования демонстрируют энергетический выигрыш от применения модифицированного кода Голден только при низких кратностях модуляции.

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

11. Заключение

Диссертационная работа А.А. Резнева является законченной научной квалификационной работой, выполненной на актуальную тему.

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».

Автореферат диссертации в достаточной мере отражает её содержание.

Андрей Алексеевич Резнев заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.13 - «Системы, сети и устройства телекоммуникаций».

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное унитарное предприятие «Ордена Трудового Красного Знамени Российский научно-исследовательский институт радио имени М.И. Кривошеева» (ФГУП 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.

Диссертация, автореферат и отзыв на диссертацию обсуждены на заседании научно-технического совета Самарского филиала ФГУП НИИР - СОНИИР (протокол заседания НТС № 6/20 от 21 августа 2020 г.).

Отзыв подготовили:

Лучин Дмитрий Вячеславович, кандидат технических наук, 05.13.05 - «Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления», директор филиала, председатель НТС филиала, Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-исследовательский институт радио» (ФГУП НИИР), Самарский филиал (филиал ФГУП НИИР - СониИР), Россия, 443011, г. Самара, ул. Советской армии, 217, тел.: +7 (846) 926-07-39, e-mail: dmyl@soniir.ru.

Маслов Евгений Николаевич, кандидат технических наук, 05.12.13 - «Системы, сети и устройства телекоммуникаций», ученый секретарь НТС филиала, Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-исследовательский институт радио» (ФГУП НИИР), Самарский филиал (филиал ФГУП НИИР - СониИР), Россия, 443011, г. Самара, ул. Советской армии, 217, тел.: +7 (846) 926-21-90, email: maslov@soniir.ru.

Директор филиала, председатель НТС филиала
ФГУП НИИР - СониИР, к.т.н.

 Д.В. Лучин

«04» 09 2020 г.

Ученый секретарь НТС филиала
ФГУП НИИР - СониИР, к.т.н.

 Е.Н. Маслов

«04» 09 2020 г.

Подписи Д.В. Лучина, Е.Н. Маслова заверяю.

Директор службы персонала ФГУП НИИР



 В.А. Тютюнова

«04» 09 2020 г.