



УТВЕРЖДАЮ
Директор ИПУ РАН
академик РАН

Д.А. Новиков

«14» января 2025г.

ОТЗЫВ

ведущей организации – федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук (ИПУ РАН) на диссертационную работу Боброва Евгения Александровича на тему «Методы машинного обучения и оптимизации для повышения эффективности многоантенных систем», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.3. Теоретическая информатика, кибернетика.

Актуальность темы диссертации

В работе Е.А. Боброва исследуются методы повышения производительности многоантенной системы беспроводной связи, использующей технологию MIMO (англ.: Multiple Input Multiple Output). Технология MIMO позволяет одновременно передавать различную информацию разным пользователям, что способствует значительному увеличению пропускной способности системы связи. MIMO используется такими современными технологиями гражданской связи, как 5G, Wi-Fi. При этом в будущих системах связи число антенн будет расти.

Тем не менее, на сегодняшний день остаются открытыми множество вопросов, связанных с оптимальной передачей данных в системах беспроводной связи, использующих MIMO. В частности, на физическом уровне, открытым является вопрос построения прекодера с низкой вычислительной сложностью, максимизирующий отношение мощности сигнала к сумме мощностей интерференции и шума (англ.: Signal to Noise and Interference Ratio, SINR).

На канальном уровне необходим алгоритм выбора сигнально-кодовой конструкции, обеспечивающей наибольшую пропускную способность при текущих канальных условиях, с учетом возможных потерь. Эта задача осложняется тем, что актуальное состояние канала в момент планирования передачи может быть неизвестно.

Оба вопроса находят свое отражение в диссертационной работе Боброва Евгения Александровича, что обуславливает ее актуальность.

Структура и содержание диссертации

Работа состоит из введения, трёх глав, заключения и списка литературы.

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цели и методы исследования, поставлены основные задачи, обоснована научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов.

Первая глава содержит модель системы MIMO. В ней описываются методы построения матриц прекодера и детектора (эквалайзера). Вводятся функции оценки пропускной способности канала связи. Ставится задача оптимизации матрицы прекодера с ограничениями на мощность базовой станции.

Во второй главе рассматриваются методы построения прекодера и эквалайзера. Приводится способ аналитического решения задачи построения прекодера, доказываются ключевые теоремы диссертации: Теорема 4 (об асимптотическом разложении матрицы прекодера ARZF) и Теорема 7 (об асимптотическом разложении функции SINR). Рассматривается новый метод градиентной оптимизации полной матрицы прекодера с учётом по-антенных ограничений, вошедший в третий пункт положений.

В третьей главе разрабатывается алгоритм выбора сигнально-кодовой конструкции, использующий методы машинного обучения и повышающий спектральную эффективность системы подвижных пользователей. Приведены результаты имитационного исследования предложенного метода и его сравнение с аналогами.

В заключении приведены основные результаты диссертации. Список литературы включает 83 публикации.

Основные результаты и их новизна

В диссертационной работе Боброва Е.А. получены следующие новые результаты.

1. Доказана теорема об асимптотическом разложении матрицы прекодера ARZF при условиях как большой, так и малой мощности шума на устройстве по сравнению с мощностью принимаемого сигнала.

2. Доказана теорема об асимптотическом разложении функции SINR для прекодера ARZF при условии, что на каждом устройстве мощность шума много меньше мощности принимаемого сигнала.

3. Предложен алгоритм оптимизации прекодера QNCD системы MIMO, использующий аппроксимацию матрицы эквалайзера MMSE-IRC, явно учитывающий по-антенные ограничения мощности и повышающий спектральную эффективность системы до 80% по сравнению с аналогом.

4. Разработан алгоритм ODL на основе нейросети для предсказания успеха передачи данных при различных сигнально-кодовых конструкциях в системе связи, использующей MIMO, который увеличивает пропускную способность системы до 20% при переменных скоростях движения пользователей по сравнению с широко используемым методом OLLA.

Достоверность результатов

Теоретические результаты диссертационной работы Е.А. Боброва сформулированы в виде доказанных диссертантом утверждений и теорем. Проведена валидация методов с помощью имитационного моделирования. Достоверность полученных результатов подтверждается корректным применением математического аппарата, а также согласованностью данных численных экспериментов.

Основные положения, сформулированные в работе Е.А. Боброва, получили апробацию на российских и международных конференциях. Полученные результаты изложены в трёх работах, опубликованных в изданиях, рецензируемых ВАК, а также в шести работах, опубликованных в изданиях, индексируемых в Scopus.

Значимость результатов

Теоретическая значимость результатов обусловлена сформулированными и доказанными теоремами, имеющими важное значение для исследования характеристик прекодеров и оценки производительности систем связи, использующих технологию ММО.

Практическая значимость заключается в том, что разработаны алгоритмы, повышающие пропускную способность систем связи, использующих технологию ММО, что подтверждено результатами имитационного моделирования. Алгоритмы могут использоваться в сотовых сетях пятого и шестого поколений, а также других многоантенных системах связи

Замечания

1. Результаты имитационного моделирования для различных методов прекодера проводятся с учётом идеального знания матрицы канала (входных данных), в то время как в реальных системах все измерения проводятся неточно, что может значительно влиять на итоговое качество работы предложенных методов.
2. Численные эксперименты для оценки производительности прекодера проведены только для статичных сценариев; не исследовано влияние эффекта устаревания канала/прекодера.
3. При перечислении научно-исследовательских и учебных организаций по тематике диссертации не упоминаются такие ведущие организации как Санкт-Петербургский институт телекоммуникаций им. Бонч-Бруевича, Институт проблем управления РАН, Московский технический университет связи и др.
4. В третьей главе излишне подробно (на 12-ти страницах диссертации) приводится информация об алгоритмах машинного обучения, описание которых имеется во многих книгах и учебниках.
5. Имеется ряд замечаний редакторского характера. В частности, в диссертации часто используются термины, являющиеся «калькой» английских терминов, вместо уже устоявшихся в русском языке. Отдельные части диссертации тяжелы

для восприятия, так как отсутствуют необходимые пояснения. Присутствуют грамматические и пунктуационные ошибки.

Отмеченные замечания не носят принципиального характера и не влияют на общую положительную оценку диссертации.

Заключительная оценка

Диссертация Боброва Евгений Александровича «Методы машинного обучения и оптимизации для повышения эффективности многоантенных систем» является научно-квалификационной работой, выполненной под руководством д.ф.-м.н., профессора Сенько Олега Валентиновича. Представленные в работе результаты и выводы обоснованы корректно. Результаты работы своевременно и полно опубликованы в 9 печатных трудах, 3 из которых – в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 6 в изданиях, индексируемых в базах научного цитирования Web Of Science или Scopus. Результаты докладывались автором на российских и международных конференциях. Автореферат верно и полно отражает содержание диссертационной работы.

Диссертация соответствует всем критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук по специальности 1.2.3. Теоретическая информатика, кибернетика, а ее автор — Бобров Евгений Александрович — заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по указанной специальности.

Диссертация и автореферат заслушаны и обсуждены на заседании семинара лаборатории № 69 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук, протокол № 16 от 21.11.2024 года.

Заведующий лабораторией № 69
«Телекоммуникационные системы»
доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки РФ

14.01.2025

В.М. Вишневский

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
«Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова» РАН
Адрес: 117997, г. Москва, Профсоюзная ул. 65
Сайт: <http://www.ipu.ru> Телефон: +7(495) 334-89-10
Факс: +7 495 334-93-40; +7 499 234-64-26
E-mail: dan@ipu.ru
Веб-сайт: <http://www.ipu.ru>

Подпись



ЗАВЕРЯЮ

Вед. инженер

Гондеева Ю.Ю.