

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

Семёновой Ольги Валерьевны

на диссертационную работу Кочетковой Ирины Андреевны
на тему «Модели для анализа эффективности приоритетного доступа
в беспроводных сетях с эластичным и потоковым трафиком»,
представленную к защите в ПДС 0200.006 на базе
Российского университета дружбы народов имени Патриса Лумумбы
на соискание ученой степени доктора физико-математических наук
по специальности 1.2.3 – Теоретическая информатика, кибернетика

Актуальность темы

Проведенное диссертационное исследование Кочетковой Ирины Андреевны «Модели для анализа эффективности приоритетного доступа в беспроводных сетях с эластичным и потоковым трафиком» посвящено решению фундаментальной научной проблемы, имеющей существенное теоретическое и народнохозяйственное значение в контексте стремительного развития современных беспроводных телекоммуникационных систем. Глобальная цифровая трансформация и появление новых классов услуг приводят к активному внедрению технологий пятого поколения (5G) и разработке основ сетей шестого поколения (6G). Эволюция сетевых архитектур сопровождается кардинальным изменением парадигмы телекоммуникационных услуг, где на смену унифицированным сервисам приходят разнородные классы трафика с полярными требованиями к качеству обслуживания (QoS). Критически важные приложения (удаленное управление, автономный транспорт, телемедицина) требуют гарантированной сверхнадежной передачи данных с ультранизкой задержкой (URLLC). Параллельно растут потребности в услугах широкополосного доступа (eMBB) для приложений дополненной реальности, UHD-видео и массового интернета вещей (mMTC). Эти сервисы порождают гетерогенный трафик с принципиально различными характеристиками – потоковый (streaming) и эластичный (elastic) трафик. Существование разнородных требований создает потребность в разработке сложных, адаптивных и эффективных механизмов приоритетного доступа и управления радиоресурсами.

Методологический аппарат математической теории телетрафика и теории массового обслуживания применяется для анализа современных сценариев беспроводных сетей. Однако традиционные модели, основанные на предположениях о линейном порядке приоритетов не позволяют адекватно исследовать комплексные процессы, характерные для сетей нового поколения.

Актуальной научной проблемой является создание стохастических моделей, способных учитывать динамическое перераспределение ресурсов между виртуальными сегментами сети (network slicing), совместное обслуживание трафика с взаимными прерываниями и приостановками сессий, адаптивное снижение скорости передачи данных, влияние внешних событий и управляющих воздействий, существенную ненадежность беспроводного канала связи, например, в миллиметровом диапазоне частот.

Теоретические результаты работы имеют непосредственное приложение для анализа ключевых технологических решений современных и перспективных сетей связи. Разработанные модели и алгоритмы позволяют проводить количественную оценку эффективности таких технологий как нарезка сети (network slicing), требующую моделей для динамического перераспределения ресурсов между изолированными виртуальными сегментами, системы совместного использования спектра (Licensed Shared Access), где важен приоритет между оператором и владельцем лицензии, работу в нелицензируемых диапазонах (Wi-Fi) и миллиметровых волнах.

Таким образом, представленное диссертационное исследование Кочетковой И.А. направлено на решение комплексной научно-технической задачи, имеющей значение для развития теоретических основ и практических решений в области построения беспроводных сетей следующего поколения. Диссертационное исследование соответствует профилю специальности 1.2.3 – Теоретическая информатика, кибернетика (по физико-математическим наукам).

Содержание диссертации

Диссертационная работа Кочетковой И.А. состоит из введения, пяти глав основного содержания, заключения, списка литературы. Общий объем диссертации составляет 340 страниц, включая 50 рисунков и 13 таблиц. Список литературы содержит 400 наименований. Структура работы является логически выстроенной и отражает последовательное решение поставленных во введении задач.

В первой главе проведен систематический анализ современных проблем приоритетного обслуживания в мультисервисных беспроводных сетях. Особое значение имеет разработанная автором концепция матрицы приоритетов в рамках классификации систем массового обслуживания в обозначениях Башарина-Кендалла. Матрица приоритетов позволяет описать взаимные приоритеты для пар классов заявок, учитывать возможность снижения скорости передачи, отражать

сложную структуру ресурса и моделировать влияние внешних событий. Дополнительно в главе представлен анализ модели «тройной услуги», особенностей моделирования радиоресурса и ключевых технологий организации современных сетей связи.

Вторая глава посвящена разработке моделей для потокового трафика с постоянным объемом ресурса. Исследование организовано вокруг двух принципиальных сценариев. Первый сценарий охватывает приоритетный доступ узкополосного трафика URLLC и широкополосного трафика eMBB с использованием механизмов обеспечения приоритета, включая прерывание, приостановку обслуживания через механизм орбит, снижение скорости и мощности сигнала. Математический аппарат главы включает построение марковских процессов и доказательство теорем для расчета стационарных распределений. Второй сценарий рассматривает модели для одноадресного и многоадресного трафика с взаимным приоритетом, где реализована возможность взаимного влияния различных классов трафика, а для анализа предложен рекуррентный алгоритм.

Третья глава содержит исследование моделей для эластичного трафика. Начальные разделы главы посвящены анализу доступа в нелицензируемых диапазонах с получением стационарного распределения в мультипликативном виде. Разработана управляемая система массового обслуживания с перераспределением ресурса по сигналам контроллера в рамках технологии нарезки радиоресурсов (network slicing). Построен марковский процесс принятия решений с векторным критерием, применяется машинное обучение для поиска политики перераспределения ресурса.

Четвертая глава адресована анализу приоритетного доступа эластичного трафика в условиях ненадежного миллиметрового диапазона. Проанализированы не только стационарные характеристики, но и введены поглощающие марковские процессы для расчета моментов времени передачи трафика с использованием преобразований Лапласа-Стилтьеса. Модели главы учитывают такие факторы как блокировки пути прямой видимости и коррелированный характер потока запросов.

Пятая глава фокусируется на потоковом трафике в условиях совместного использования лицензируемых радиочастот. Представлен скалярный алгоритм расчета среднего числа приостановленных сессий, матричный алгоритм символьного вычисления преобразования Лапласа-Стилтьеса длительности периода занятости системы. Отмечу задачу поиска политики управления с гистерезисным доступом и применение генетического алгоритма.

Заключение работы содержит изложение основных научных результатов.

Достоверность и новизна результатов диссертации

Научная новизна представленной работы заключается в следующем:

1. Разработан комплекс моделей приоритетного доступа на основе единого описания через матрицы приоритетов, позволяющей задавать приоритет для каждой пары классов заявок, учитывать возможность снижения скорости, различные типы ресурсов и влияние внешних событий. В отличие от традиционных подходов, где использовался линейный порядок приоритетов с акцентом на относительный или абсолютный доступ к ресурсу, предложенная матрица обеспечивает гибкость при описании современных беспроводных сетей.
2. Для сценариев совместного обслуживания URLLC и eMBB трафика разработана модель, учитывающая задержку на попытки начала и возобновления передачи через механизм орбит, а также использующая дискриминаторное разделение слота времени. В отличие от ранее использовавшихся систем с очередями и равным разделением кадра времени, предложенное решение более адекватно описывает процессы в условиях приоритетного доступа. Для одноадресного и многоадресного трафика реализована модель с взаимным приоритетом, учитывающая два режима мультимедийного вещания, что расширяет возможности анализа по сравнению с существующими подходами.
3. При моделировании эластичного трафика предложен новый механизм приоритетного доступа через прерывание менее приоритетных сессий, в отличие от традиционного дискриминаторного разделения ресурса по весовым коэффициентам. Для задач сетевой нарезки разработана модель с управляемым перераспределением ресурса на основе марковского процесса принятия решений, что позволяет учитывать внешние события в отличие от существующих подходов, ориентированных только на внутренние события системы.
4. Для условий работы с ненадежными ресурсами создана модель доступа эластичного трафика, реализующая приоритет через приостановку сессии с размещением в конечной очереди и учитывающая марковский входящий поток. В предыдущих исследованиях рассматривались надежные ресурсы и бесконечные очереди.

5. В области анализа потокового трафика предложен скалярный алгоритм расчета среднего числа приостановленных сессий, являющийся альтернативой матричным методам решения систем уравнений равновесия. Разработана модель доступа к частично ненадежному ресурсу с использованием управляемой системы массового обслуживания. Создана модель с зависимым занятием различных типов ресурсов, учитывающая взаимное влияние мощности сигнала и слота времени, в отличие от ранее исследованных систем с надежными приборами и независимым занятием ресурсов.

Достоверность полученных результатов обеспечивается корректностью методологической основы, базирующейся на строгом математическом аппарате теории массового обслуживания и математической теории телетрафика. Доказательства теорем и лемм выполнены с соблюдением требований математической строгости. Установлено качественное совпадение частных случаев разработанных моделей с известными классическими результатами. Все выводы логически следуют из проведенного анализа и представленного математического аппарата, что свидетельствует о достоверности полученных результатов.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Представленные в диссертации научные положения и выводы характеризуются высокой степенью обоснованности. Она обеспечивается последовательным применением аппарата математической теории телетрафика и теории массового обслуживания. Выбор методологии полностью соответствует природе исследуемых процессов в беспроводных сетях, характеризующихся стохастичностью, динамичностью и наличием случайных событий. Математическая строгость проведенных исследований проявляется в корректности всех доказательств и выводов. Логическая взаимосвязь между задачами, методами и результатами исследования прослеживается на протяжении всей работы. Качественное совпадение частных случаев разработанных моделей с известными классическими результатами теории массового обслуживания служит важной проверкой. Результаты внедрены в учебный процесс и научно-исследовательскую деятельность.

Ценность для науки и практики результатов работы

Результаты диссертационного исследования Кочетковой И.А. обладают ценностью как для науки, так и для прикладных областей телекоммуникаций. Теоретическая и научная ценность работы заключается во вкладе в развитие математической теории телетрафика. Разработанный комплекс марковских моделей представляет собой качественное расширение аппарата этих дисциплин. В единой методологии, основанной на матрице приоритетов, исследованы сценарии совместного обслуживания трафика с применением механизмов прерывания, приостановки, снижения скорости и мощности, а также учета ненадежности ресурсов и внешних управляющих событий. Научную ценность представляют разработанные матричные, рекуррентные и скалярные алгоритмы расчета стационарных распределений, моментов времени передачи данных и длительности периода занятости. Алгоритмы символьного вычисления преобразований Лапласа-Стилтьеса для анализа поглощающих марковских процессов применены для исследования временных характеристик сложных систем. Интеграция марковских процессов принятия решений и генетического алгоритма демонстрирует перспективность междисциплинарного подхода на стыке теории телетрафика и машинного обучения.

Практическая и прикладная ценность работы подтверждается созданием инструментальной базы для проектировщиков и операторов сетей связи. Разработанные модели и алгоритмы позволяют проводить количественный анализ и настраивать ключевые параметры беспроводных сетей для конкретных сценариев, включая определение требований к пропускной способности для услуг URLLC и eMBB, настройку политик приоритетного доступа к радиоресурсам для нарезки сети и совместного использования спектра, расчет показателей качества обслуживания пользователей в миллиметровом диапазоне с учетом блокировок. Внедрение результатов в научно-исследовательскую деятельность подтверждается их использованием в НИР, выполненных при поддержке грантов РФФИ и программы Президента РФ. Использование результатов в преподавании дисциплин в РУДН способствует подготовке высококвалифицированных кадров.

Подтверждение опубликования основных результатов диссертации в научной печати

Основные научные результаты и положения диссертационной работы Кочетковой И.А. получили широкое освещение в научной печати, что в полной мере соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание

ученой степени доктора наук. Объем и состав публикаций автора являются более чем достаточными для докторской диссертации – по теме исследования опубликовано 55 научных работ. Наиболее показательными являются публикации в изданиях, индексируемых в международных базах данных: 31 работа в журналах и трудах конференций, индексируемых в Web of Science и Scopus. Среди них – статьи в высокорейтинговых журналах, таких как «Mathematics», «Future Internet», «IEEE Access», «Journal of Sensor and Actuator Networks», что свидетельствует о признании результатов работы международным научным сообществом и соответствии ее уровня мировым стандартам. Значительное внимание уделено публикации результатов в российских рецензируемых изданиях: 12 работ в журналах, индексируемых в RSCI, и 1 работа в журнале, рекомендованном Перечнем ВАК РФ.

Анализ тематики публикаций подтверждает полное соответствие содержания работ основным направлениям диссертационного исследования. Имеются также 7 зарегистрированных свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ, 2 монографии и учебно-методическое пособие. Все приведенные в списке работы напрямую соответствуют теме диссертации и охватывают все направления исследования.

Соответствие содержания автореферата основным положениям диссертации

Проведенный сравнительный анализ текста диссертации и представленного автореферата позволяет утверждать, что содержание автореферата полностью и адекватно отражает основные положения, научные результаты и выводы диссертационного исследования. Автореферат логически воспроизводит структуру диссертации, последовательно раскрывая суть проведенных исследований по всем главам работы. Во введении автореферата корректно и в полном объеме изложены актуальность, цель, задачи, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы. Все положения, выносимые на защиту, нашли точное отражение в автореферате. Методологическая основа исследования представлена в автореферате с достаточной полнотой. Каких-либо существенных расхождений между содержанием автореферата и текстом диссертации не выявлено.

Замечания по работе

- 1 В диссертации преобладают модели с пуассоновскими входными потоками, что упрощает анализ, но не всегда соответствует реальному

- коррелированному характеру современного трафика в сетях 5G/6G. Следовало бы провести сравнительное исследование влияния корреляции входного трафика на показатели производительности сети.
- 2 В главах 3-4 рассматриваются механизмы приостановки и возобновления сессий эластичного трафика при изменении доступного ресурса. По аналогии с главой 2, интересно было бы использовать для этой цели орбиту с контролируемой интенсивностью повторных вызовов, что позволило бы унифицировать подход к моделированию повторных попыток доступа для различных типов трафика.
 - 3 Диссертация акцентирует внимание на стационарных вероятностных характеристиках систем, однако в динамических сценариях нарезки сети ресурсы перераспределяются периодически. Следовало бы также проанализировать время достижения стационарного режима после изменения параметров выделения ресурса.
 - 4 В работе введена матричная нотация приоритетов, определяющая пары приоритетов для каждого сочетания классов трафика. Однако не вполне ясно, как разрешаются конфликты при одновременном поступлении нескольких заявок различных классов с пересекающимися приоритетами.
 - 5 В главах 2 и 5 рассматриваются модели с потоковым трафиком с политикой Round Robin, где мощность передачи уменьшается/увеличивается пропорционально числу активных сессий. Следовало бы провести также анализ показателей энергоэффективности, поскольку снижение мощности сигнала критически важно для общей энергоэффективности сети.
 - 6 В работе присутствует ряд опечаток и редакционных недочетов.
- Приведенные замечания не снижают научную ценность результатов диссертационной работы и не влияют на ее положительную оценку.

Заключение

Диссертационное исследование Кочетковой Ирины Андреевны является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится новое решение научной проблемы разработки математических моделей и алгоритмов для анализа эффективности приоритетного доступа в беспроводных сетях с совместным обслуживанием эластичного и потокового трафика, имеющей важное значение для развития теории телетрафика и практического проектирования систем связи следующего поколения. Работа соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук,

согласно п. 2.1 раздела II Положения о присуждении ученых степеней в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы», утвержденного ученым советом РУДН протокол № УС-1 от 22.01.2024 г., а ее автор, Кочеткова Ирина Андреевна, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.2.3 – Теоретическая информатика, кибернетика.

Официальный оппонент, Семёнова Ольга Валерьевна, доктор физико-математических наук (05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ), ведущий научный сотрудник лаборатории телекоммуникационных систем Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук, тел.: +7 495 198-17-20, e-mail: olgasmnv@gmail.com.



Семёнова Ольга Валерьевна

«20» октября 2025 г.

Подпись Семёновой О.В. заверяю

Подпись 
ЗАВЕРЯЮ
ВЕД. ИНЖЕНЕР
ЗАЛОЖНЕВА Т.П.



Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук
Адрес: 117997 Москва, ул. Профсоюзная, д. 65
Тел.: +7 495 334-89-10. Факс: +7 495 334-93-40, +7 499 234-64-26. E-mail: dan@ipu.ru
Страница в интернете: <https://www.ipu.ru>