

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

Семеновой Ольги Валерьевны

на диссертационную работу Сопина Эдуарда Сергеевича на тему
«Модели ресурсных систем массового обслуживания и их применения
к анализу и расчету показателей эффективности беспроводных сетей»,
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 Сопина Эдуарда Сергеевича «Модели ресурсных систем массового обслуживания и их применения к анализу и расчету показателей эффективности беспроводных сетей» посвящено решению фундаментальной научной проблемы, имеющей существенное теоретическое и народнохозяйственное значение в контексте стремительного развития беспроводных телекоммуникационных систем.

Использование миллиметровых и терагерцовых диапазонов частот в сетях пятого/шестого поколений призвано обеспечить максимальную пропускную способность сети радиодоступа, что позволит внедрять новые приложения, требовательные к скорости передачи данных, такие как виртуальная реальность, дополненная реальность и голографическое телеприсутствие. Однако присущие этим диапазонам особенности, в том числе необходимость обеспечения чрезвычайно высокой диаграммы направленности излучения на обеих сторонах канала связи для компенсации экстремальных потерь при распространении сигнала, блокирование путей распространения сигнала крупными объектами, такими как здания, или небольшими динамическими препятствиями, такими как люди и транспортные средства, а также макро- и микромобильность пользовательского оборудования, могут существенно повлиять на производительность этих технологий, что часто приводит либо к резкому снижению скорости передачи данных, либо к полной потере связи. Для решения этих проблем предлагаются новые механизмы, позволяющие поддерживать заявленную производительность. Для оценки эффективности этих механизмов необходимы методы оценки их показателей эффективности, которые позволяют учитывать эти особенности.

Методологический аппарат математической теории телетрафика и теории массового обслуживания применяется для анализа современных

сценариев беспроводных сетей. Однако традиционные модели не позволяют адекватно моделировать вариативность требований сессий передачи данных к частотному ресурсу совместно с особенностями использования новых частот. В связи с этим разработка моделей ресурсных систем массового обслуживания (РеСМО), в которых заявкам для обслуживания требуется случайный объем ограниченного ресурса, а также способных учитывать существенную ненадежность беспроводного канала связи в высокочастотных диапазонах и особенности технологий радиодоступа, является актуальной научной проблемой, которой посвящена диссертационная работа Сопина Э.С.

Представленное диссертационное исследование по разработке моделей ресурсных систем массового обслуживания, методов их исследования и применения к анализу и расчету показателей эффективности беспроводных сетей 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 состоит из введения, пяти глав основного содержания, заключения, списка литературы. Общий объем диссертации составляет 214 страниц, включая 47 рисунков и 10 таблиц. Список литературы содержит 246 наименований. Структура работы является логически выстроенной и отражает последовательное решение поставленных во введении задач.

В первой главе обобщены ключевые достижения в изучении РеСМО. Особое внимание уделено подходам к построению случайного процесса, описывающего поведение ресурсных систем. Также предложен способ построения функции распределения для случайных запросов пользователей на сетевые ресурсы.

Вторая глава рассматривает РеСМО, в которых имеются только два типа событий – поступление заявки и уход заявки из системы по завершении обслуживания. Для расчета вероятностных характеристик при пуассоновском входящем потоке выведен сверточный алгоритм, область применения которого была расширена на случай нескольких входящих потоков заявок. Доказано свойство нечувствительности стационарного распределения к виду распределения времени обслуживания при пуассоновском входном потоке.

Дополнительно проведен анализ системы с более сложным МАР-потокм заявок.

Третья глава посвящена ресурсным системам с сигналами. Под сигналом понимается наступление события, при котором некоторая заявка освобождает занятый ранее объем ресурса, запрашивает новый и пытается продолжить обслуживание. Такие модели позволяют описывать резкие изменения качества радиоканалов в высокочастотных сетях. Разработан метод приближенного расчета вероятностей потери и прерывания заявок на основе имитирующей ресурсной системы без сигналов, но с дополнительным входящим потоком, интенсивность которого вычисляется итерационно.

Четвертая глава посвящена применениям разработанных методов анализа на базе РеСМО к расчету показателей эффективности функционирования сетей радиодоступа пятого поколения «Новое радио», использующих диапазон миллиметровых длин волн. Исследованы два механизма, призванных повысить непрерывность пользовательских сессий в периоды блокировки пути прямого распространения сигнала, а также влияние настойчивого поведения пользователей на показатели эффективности.

В пятой главе проведен анализ двух сценариев гетерогенных сетей радиодоступа пятого и шестого поколений. Рассмотрены системы, сочетающие лицензированный и нелицензированный диапазоны для увеличения емкости, а также механизм выгрузки трафика с базовой станции, использующей терагерцевый диапазон частот, на базовую станцию, функционирующую в диапазоне миллиметровых длин волн.

Заключение содержит изложение основных научных результатов работы.

Достоверность и новизна результатов диссертации

Научная новизна представленной работы заключается в следующем:

1. Разработан сверточный алгоритм расчета вероятности потери заявки и моментов числа занятых единиц ресурса в РеСМО с пуассоновским входящим потоком и дискретными требованиями к ресурсу.
2. Доказано свойство нечувствительности стационарных характеристик РеСМО с пуассоновским входящим потоком и интенсивностями поступления и обслуживания, зависящими от числа заявок в системе, к виду функции распределения времени обслуживания.
3. Разработана модель РеСМО с сигналами, при поступлении которых заявка изменяет требуемый объем ресурсов, генерирует новый объем и пытается продолжить обслуживание. В случае, когда система не может

предоставить заявке новый требуемый объем ресурса, ее обслуживание прерывается, что позволяет моделировать реальные сценарии отказов или прерываний в работе системы.

4. Разработан метод приближённого анализа РеСМО с сигналами. Поведение РеСМО с сигналами имитируется поведением РеСМО без сигналов, но с дополнительным входящим потоком. Была доказана теорема о виде стационарного распределения цепи Маркова, вложенной по моментам окончания обслуживания, результаты которой использованы для повышения точности расчета вероятности потери и прерывания.
5. Разработанные методы анализа РеСМО были применены для анализа беспроводных сетей пятого и последующих поколений. Построенные модели, в отличие от предыдущих, позволили учесть особенности механизмов выделения радиоресурсов, зависящих от набора кодово-модуляционных схем, мобильность пользовательских устройств, эффекты блокировок прямого пути распространения сигнала в сетях миллиметрового диапазона частот и связанную с ними нестабильность радиоканала, а также механизмы резервирования ресурсов, мультисвязности и выгрузки трафика, направленные на повышение показателей непрерывности сессий передачи данных.

Достоверность полученных результатов обеспечивается корректностью методологической основы, базирующейся на строгом математическом аппарате теории случайных процессов, 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 теории случайных процессов, 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 Сопина Э.С. обладают ценностью как для науки, так и для прикладных областей телекоммуникаций. Теоретическая и научная ценность работы заключается в существенном вкладе в развитие математической теории телетрафика и теории массового обслуживания. Разработан эффективный вычислительный алгоритм для расчета вероятностных характеристик простейших РеСМО, применимость которого была расширена и на системы с несколькими входящими потоками. Доказано свойство инвариантности относительно вида функции распределения времени обслуживания для широкого класса РеСМО. Разработаны РеСМО с сигналами, предложены точные и приближенные методы расчета их вероятностно-временных характеристик, что существенно расширяет аппарат указанных математических дисциплин.

Практическая и прикладная ценность работы подтверждается созданием инструментальной базы для проектировщиков и операторов сетей связи. Разработана методология расчета показателей эффективности современных сетей радиодоступа. Разработанные модели и алгоритмы позволяют проводить количественный анализ и настраивать ключевые параметры беспроводных сетей для конкретных сценариев, включая механизмы повышения непрерывности сессий, а также сценарии совместного использования нескольких технологий радиодоступа. Внедрение результатов в научно-исследовательскую деятельность подтверждается их использованием в НИР, выполненных при поддержке грантов РНФ и РФФИ. 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 Сопина Э.С. 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 85 научных работ. Наиболее показательными являются публикации в изданиях, индексируемых в международных базах данных: 50 работ в журналах и трудах конференций, индексируемых в Web of Science и Scopus. Среди них статьи в высокорейтинговых журналах, таких как «IEEE Communications Surveys & Tutorials», «IEEE Transactions on Wireless Communications», «IEEE Transactions on Vehicular Technology», «IEEE Wireless Communication Letters», «Mathematics», что свидетельствует о признании результатов работы международным научным сообществом и соответствии ее уровня мировым стандартам. Значительное внимание уделено публикации результатов в российских рецензируемых изданиях: 8 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 15 зарегистрированных свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ, 2 монографии и 3 учебных пособия. 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. Возможно, стоило рассмотреть более общее предположение о характере входных потоков для ряда моделей, рассмотренных в главах 3-5 диссертации, как это сделано в главе 2.
2. Численный пример в разделе 2.4 получился довольно сжатым. Для полноты изложения следовало подробнее описать способ вычисления автокорреляционной функции с лагом 1 и коэффициента вариации ММРР-потока и расширить дискуссию о влиянии этих параметров на вероятностные характеристики системы.
3. Для доказательства сходимости итерационного алгоритма для метода приближенного расчета вероятностей потери и прерывания в РеСМО с сигналами в разделе 3.2 доказана теорема 3.1. Однако для модифицированного метода приближенного расчета в разделе 3.3 аналогичная теорема не была сформулирована.
4. Следовало бы дать рекомендации к выбору приближенных итерационных методов решения системы линейных уравнений для стационарного распределения вероятностей состояний РеСМО с сигналами и повторными вызовами (раздел 4.4).
5. Отсутствуют выводы к основным главам диссертации (главы 3-5).
6. В работе имеется ряд опечаток и стилистических неточностей, например, подпись к рисунку 3.11 не соответствует содержимому рисунка.

Однако приведенные замечания не снижают научную ценность результатов диссертационной работы и численного эксперимента, не снижают теоретической и практической значимости полученных результатов, а также общую положительную оценку выполненной диссертационной работы.

Заключение

Диссертационное исследование Сопина Эдуарда Сергеевича является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной проблемы разработки моделей ресурсных систем массового обслуживания и методов расчета их вероятностных характеристик для оценки показателей эффективности перспективных сетей мобильной связи, 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, Сопин Эдуард Сергеевич, 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), заведующий лабораторией, ведущий научный сотрудник лаборатории 69 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: olga.semenova@ipu.ru

«10» сентября 2026 г.



Семёнова Ольга Валерьевна



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>