

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

Моисеевой Светланы Петровны

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

Диссертация Сопина Эдуарда Сергеевича «Модели ресурсных систем массового обслуживания и их применения к анализу и расчету показателей эффективности беспроводных сетей» направлена на решение фундаментальной научной проблемы на пересечении теоретической информатики, математической кибернетики и современных телекоммуникационных технологий. Актуальность темы обусловлена рядом ключевых факторов, определяющих развитие телекоммуникационной инфраструктуры на ближайшие десятилетия.

Стремительное развитие беспроводных сетей, направленное на внедрение технологий пятого и шестого поколений, сопровождается экспоненциальным ростом объема передаваемого трафика и разнообразия предоставляемых услуг. Ожидается, что технологии радиодоступа в миллиметровом и терагерцевом диапазонах станут важной частью будущей сотовой экосистемы, обеспечив достаточную пропускную способность в регионах с высокой интенсивностью трафика. Однако чрезвычайно высокая направленность антенн, которую необходимо использовать как на передающей, так и на принимающей стороне канала связи для компенсации значительных потерь распространения, динамическое блокирование путей распространения сигнала крупными статичными и мелкими динамичными объектами, а также макро- и микромобильность пользовательского оборудования делают обеспечение надёжного обслуживания в терагерцевых и миллиметровых диапазонах чрезвычайно сложной задачей.

Особенности этих сетей и предложенные стандартизирующими организациями механизмы повышения непрерывности пользовательских сессий требуют разработки принципиально новых математических моделей. Эти модели должны учитывать изменчивую пропускную способность беспроводных каналов, зависящую от отношения сигнала к шуму в конкретных точках расположения пользователей и используемых модуляционно-кодовых схем, и особенности технологии радиодоступа. Существующие модели теории массового обслуживания и математической теории телетрафика не полностью охватывают специфику современных сценариев, включая одновременное подключение устройства к

нескольким базовым станциям, а также выгрузку трафика в нелицензируемый диапазон частот для повышения емкости сети.

Разработка комплексного математического аппарата на базе ресурсных систем массового обслуживания (РеСМО) для расчета показателей эффективности перспективных сетей мобильной связи на участке радиодоступа является актуальной научной задачей, имеющей важное народнохозяйственное значение. Диссертационное исследование Сопина Э.С. направлено на решение этой задачи, что определяет его актуальность, и соответствует профилю специальности 1.2.3 Теоретическая информатика, кибернетика (по физико-математическим наукам).

Содержание диссертации

Диссертационная работа Сопина Э.С. структурно состоит из введения, пяти глав основного содержания, заключения, списка литературы из 246 наименований.

Во введении дано развернутое обоснование актуальности темы, сформулированы цель и задачи исследования, раскрыты научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы. Определены положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен обзор основных результатов в области анализа РеСМО. Предложены два подхода, описывающих функционирование ресурсной системы, в виде случайного списка и случайного псевдосписка. Разработан метод построения функции распределения, описывающей случайные требования пользователей к объему ресурсов сети, который учитывает особенности технологии радиодоступа и используемый набор модуляционно-кодовых схем.

Во второй главе проведен анализ простейших РеСМО, в которых имеется только два типа событий – поступление новой заявки и уход заявки после завершения обслуживания. Разработан эффективный алгоритм для расчета вероятностных характеристик, показано, что он может быть использован, в том числе, для систем с несколькими входящими потоками. Доказана теорема о нечувствительности РеСМО с пуассоновским входящим потоком к виду распределения времени обслуживания. Проведен анализ ресурсной системы с более сложным МАР-поток (Markov Arrival Process) заявок.

Третья глава посвящена анализу РеСМО с сигналами, поступление которых вызывает изменение объема требуемого некоторой заявке ресурса. В результате изменения объема требуемого ресурса в таких системах возникают прерывания обслуживания заявок. Разработаны точный и приближенный метод вычисления вероятностных характеристик. Для повышения точности приближенного метода доказана теорема о виде стационарного распределения РеСМО без сигналов в моменты окончания обслуживания заявок.

Четвертая и пятая главы посвящены прикладным аспектам применения разработанного аналитического инструментария на базе РеСМО к анализу сетей

пятого и шестого поколений. Так, в четвертой главе проведен анализ производительности сети радиодоступа «Новое радио» в миллиметровом диапазоне частот в условиях применения различных механизмов повышения непрерывности пользовательских сессий, а также влияние настойчивого поведения пользователей на показатели эффективности сети.

В пятой главе проведен анализ сценариев с использованием нескольких технологий радиодоступа. Исследована система, в которой для повышения емкости сети наряду с лицензированным диапазоном частот используется и нелицензированный. Кроме того, проведен анализ гетерогенной сети радиодоступа с совместным использованием миллиметрового и терагерцевого диапазонов частот.

Достоверность и новизна результатов диссертации

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием строгого математического аппарата, корректным выбором математических методов, соответствием результатов поставленным задачам и апробацией на ведущих международных конференциях и в рецензируемых научных изданиях.

Научная новизна заключается в следующих результатах:

1. Для расчета вероятностных характеристик РеСМО с одним или несколькими пуассоновскими входящими потоками и дискретными требованиями к ресурсу разработан сверточный алгоритм.
2. Для РеСМО с пуассоновским входящим потоком и интенсивностями поступления и обслуживания, зависящими от состояния системы, доказано свойство нечувствительности стационарного распределения к виду функции распределения времени обслуживания.
3. Разработана новая модель РеСМО с сигналами. Поступление сигналов вызывает изменение требуемого заявками объемов ресурса, что может приводить к прерыванию обслуживания заявок при недостатке ресурса системы.
4. Доказана теорема о мультипликативном виде стационарного распределения РеСМО без сигналов в моменты окончания обслуживания заявок. Для приближённого расчета вероятностных характеристик РеСМО с сигналами разработан метод на основе имитирующей модели РеСМО без сигналов, но с дополнительным входящим потоком, интенсивность которого вычисляется итерационно с помощью распределения по вложенной по моментам окончания обслуживания цепи Маркова.
5. Разработанные методы анализа и расчета РеСМО позволили моделировать различные сценарии функционирования перспективных сетей радиодоступа и проводить оценку показателей их эффективности, включая механизмы резервирования ресурсов, множественных подключений с несколькими базовыми станциями, а также сценарии гетерогенных сетей с несколькими технологиями радиодоступа.

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

Научные положения и выводы диссертации характеризуются высокой степенью обоснованности. Разработанные модели и алгоритмы основаны на строгих математических методах, таких как теория марковских процессов, теория массового обслуживания и математическая теория телетрафика. Применение методов стохастической геометрии и имитационного моделирования соответствует поставленным задачам.

Все положения работы согласованы и непротиворечивы. Выводы логически вытекают из анализа и корректно интерпретированы с учетом особенностей систем. Разработанные модели и методы отражают современные тенденции развития беспроводных сетей и учитывают актуальные требования качества обслуживания. Научные положения, выводы и рекомендации диссертации являются обоснованными и заслуживают доверия.

Ценность для науки и практики результатов работы

Теоретическая ценность результатов диссертации заключается в развитии математического аппарата теории массового обслуживания и математической теории телетрафика. Разработанные методы анализа и расчета РеСМО без сигналов, методы точного и приближенного расчета РеСМО с сигналами, а также РеСМО с повторными вызовами представляют значительный интерес для развития аналитических методов исследования сложных систем.

Практическая ценность работы подтверждается непосредственной применимостью результатов для проектирования и оптимизации беспроводных сетей 5G/6G. Разработанные модели и алгоритмы позволяют проводить количественную оценку показателей качества обслуживания в различных сценариях функционирования, учитывая особенности частот миллиметровых длин волн, аспекты множественного подключения мобильных устройств к нескольким базовым станциям и использование нелицензированных диапазонов частот для повышения емкости сети.

Результаты нашли практическое применение в научно-исследовательских проектах и учебном процессе, подтверждая их востребованность и реализуемость. Предложенные подходы могут использоваться при проектировании перспективных беспроводных сетей операторами связи и производителями телекоммуникационного оборудования.

Подтверждение опубликования основных результатов диссертации в научной печати

Основные научные результаты диссертации опубликованы в рецензируемых журналах, что подтверждает их достоверность и соответствие современным научным стандартам. Автор имеет 85 научных публикаций, среди которых 50 статей в журналах, индексируемых в международных базах данных Web of Science и Scopus, 8 статей в российских журналах, индексируемых в RSCI, 1 статья в журнале из перечня ВАК, 15 свидетельств о регистрации программ для ЭВМ, 2 монографии, 3 учебных пособия.

Наиболее значимые результаты опубликованы в ведущих международных журналах, таких как Mathematics (Q1 в Scopus), IEEE Communications Surveys & Tutorials (Q1 в Scopus), IEEE Transactions on Wireless Communications (Q1 в Scopus), IEEE Transactions on Vehicular Technology (Q1 в Scopus), и Automation and Remote Control. Эти публикации отражают ключевые положения диссертации.

Работы автора также опубликованы в сотрудничестве с зарубежными учеными из Финляндии, Великобритании и других стран, что свидетельствует о международном признании его исследований. Разработанные алгоритмы и методы защищены 15 свидетельствами о государственной регистрации программ для ЭВМ, что подчеркивает их практическую значимость и возможность реализации.

Соответствие содержания автореферата основным положениям диссертации

Автореферат адекватно и полно отражает основное содержание диссертационной работы. В нем идентично тексту диссертации сформулированы цель и задачи исследования, полностью соответствуют содержанию работы пять элементов научной новизны, а положения, выносимые на защиту, корректно отражают основные научные результаты.

Композиция автореферата логически следует структуре диссертации. Общая характеристика работы соответствует введению, описание основного содержания по главам точно отражает материал глав 1-5, а заключительная часть автореферата адекватно представляет выводы диссертации. Все математические модели, формулы, алгоритмы и методы расчета, приведенные в автореферате, соответствуют диссертации и представлены без искажений. Теоретические положения и выводы также сформулированы адекватно. Объем информации в автореферате достаточен для понимания сущности выполненных исследований, научной новизны и значимости работы, а также основных теоретических и практических результатов.

Таким образом, автореферат полностью соответствует содержанию диссертационной работы, достоверно отражает полученные научные результаты и обеспечивает возможность объективной оценки вклада соискателя в развитие науки.

Замечания по работе

Диссертация выполнена качественно с точки зрения оформления и логичной структуры. Тем не менее, содержание работы вызывает следующие вопросы и замечания:

1. В работе следовало бы отразить существенные отличия предлагаемых моделей от результатов зарубежных и российских исследователей, а также согласованность с уже известными частными случаями (в случае нересурсных моделей).
2. К разработанному в разделе 2.1 сверточному алгоритму расчета вероятностных характеристик РеСМО следовало добавить комментарии о том, насколько увеличивается его сложность при рассмотрении системы с несколькими типами ресурсов.
3. В параграфе 4.4.1 при рассмотрении РеСМО с повторными вызовами, при повторной попытке заявка формирует новое требование к ресурсу, хотелось бы получить комментарии по поводу адекватности такого предположения реальным техническим задачам. Здесь же предполагается, что при поступлении сигнала заявка освобождает занятый ранее объем ресурса, генерирует новое требование (из технической постановки следует, что требует большего объема) и пытается продолжить обслуживание. Но в случае невозможности обслужиться заявки отправляются в ту же орбиту, то есть не отличаются от всех. Возможно, следовало бы ввести в рассмотрение другую орбиту для «искаженных» заявок? Также параметры обслуживания логичнее предположить разными.
4. Учитывая, что автором разработана имитационная модель рассматриваемой системы, было бы интересно рассмотреть влияние параметров неэкспоненциального обслуживания при аналогичной загрузке на систему.
5. В работе имеется ряд опечаток и стилистических погрешностей.

Указанные замечания не снижают уровня научной новизны, теоретической и практической значимости, 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 математического аппарата в виде моделей РеСМО и методов из расчета для оценки показателей эффективности перспективных сетей радиодоступа, имеющей важное значение для реализации современных технологий беспроводной связи. 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 Моисеева Светлана Петровна, доктор физико-математических наук (05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ), профессор, заведующий кафедрой теории вероятностей и математической статистики института прикладной математики и компьютерных наук Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», тел.: +7 (913) 815-32-62, e-mail: smoiseeva@mail.ru

« 1» сентября 2026 г.



Моисеева Светлана Петровна

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет»
Адрес: 634050 Томская обл., Томск, просп. Ленина, д. 36
Тел.: +7 (3822) 529-585. E-mail: rector@tsu.ru
Страница в интернете: <https://tsu.ru>

Подпись Моисеевой С.П. заверяю



Подпись удостоверяю
Ведущий документовед
Андрienko И.В.

