

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

Степанова Сергея Николаевича

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

Представленная диссертационная работа Сопина Э.С. «Модели ресурсных систем массового обслуживания и их применения к анализу и расчету показателей эффективности беспроводных сетей» посвящена решению фундаментальной научной проблемы, имеющей существенное значение для развития современных и перспективных беспроводных телекоммуникационных систем. Актуальность проведенного исследования обусловлена совокупностью технологических и научно-методических вызовов, стоящих перед отраслью связи.

Пропускную способность современной сети на беспроводном участке доступа сложно оценить вне контекста сценария использования. В зависимости от расположения мобильного устройства относительно базовой станции и качества радиоканала его пропускная способность может меняться в десятки раз из-за использования различных схем модуляции и кодирования. Из-за мобильности устройств и частой смены условий в плотной городской застройке скачки пропускной способности радиоканалов происходят непосредственно в течение сессий передачи данных. Существующие классические модели телетрафика не способны адекватно описывать динамику обслуживания пользователей и распределение частотного ресурса базовой станции в таких условиях.

Дополнительную сложность вносит использование в сетях пятого и шестого поколений высокочастотного спектра в диапазоне миллиметровых длин волн. Радиоканалы в этом диапазоне крайне чувствительны к наличию даже небольших препятствий на пути прямого распространения сигнала между мобильным устройством и базовой станцией. Для поддержания непрерывности пользовательских сессий передачи данных был предложен ряд механизмов, однако для оценки их эффективности требуется разработать математические модели, позволяющие учитывать их особенности.

С научно-методологической точки зрения, актуальность работы определяется необходимостью адаптации и развития классического аппарата теории массового обслуживания и математической теории телетрафика к новым вызовам. Диссертация делает существенный вклад в развитие теории ресурсных систем массового обслуживания, разработанные вычислительные алгоритмы позволяют рассчитывать показатели эффективности современных мобильных сетей в различных сценариях использования. Таким образом, диссертационное исследование соответствует профилю специальности 1.2.3 – Теоретическая информатика, кибернетика (по физико-математическим наукам). Полученные результаты имеют существенное значение для теории и практики построения сетей нового поколения.

Содержание диссертации

Диссертационная работа Сопина Э.С. представляет собой законченное системное исследование, отличающееся целостностью структуры и методологической строгостью. Объем работы составляет 214 страниц, включая введение, пять основных глав, заключение, список литературы из 246 источников, 47 рисунков и 10 таблиц.

Введение содержит аргументацию актуальности темы, формулировку цели и задач исследования, анализ степени разработанности проблемы. Особое внимание уделено обоснованию научной новизны, теоретической и практической значимости работы, а также формулировке положений, выносимых на защиту.

В первой главе систематизированы основные результаты в области анализа ресурсных систем массового обслуживания. Центральной частью главы является описание случайного процесса, описывающего функционирование ресурсной системы, в виде случайного списка и случайного псевдосписка. Кроме того, разработан метод построения функции распределения, описывающей случайные требования пользователей к объему ресурсов сети.

Вторая глава посвящена анализу простейших ресурсных систем. Выведен сверточный алгоритм для расчета вероятностных характеристик, доказано свойство нечувствительности к виду распределения времени обслуживания заявок при условии пуассоновского входящего потока. Была также исследована ресурсная система массового обслуживания с более сложным МАР-поток (Markov Arrival Process) заявок.

В третьей главе разработаны и исследованы ресурсные системы массового обслуживания с сигналами, при поступлении которых заявки освобождают ранее занятый объем ресурса, генерируют новый объем и

пытаются его занять, продолжив обслуживание. Данный класс ресурсных систем позволяет моделировать скачки качества радиоканалов, характерных для высокочастотных сетей доступа. Получены точный и приближенный метод вычисления вероятностных характеристик.

Четвертая и пятая главы посвящены применениям разработанного аналитического инструментария на базе ресурсных систем массового обслуживания к анализу сценариев функционирования сетей пятого и шестого поколений. Так, в четвертой главе исследованы различные механизмы, предназначенные для повышения непрерывности сессий передачи данных. Проведен анализ механизма резервирования части полосы пропускания, механизма мультисвязности, основанного на поддержании соединений с несколькими базовыми станциями, а также их комбинации.

В пятой главе проведен анализ показателей эффективности сценариев с использованием нескольких технологий радиодоступа. Исследована система с совместным использованием лицензированного и нелицензированного диапазонов частот для повышения емкости сети, а также система выгрузки трафика с базовой станции терагерцевого диапазона частот.

Заключение содержит изложение основных научных результатов работы.

Изложение материала характеризуется математической корректностью и подкреплено численными примерами, подтверждающими практическую значимость полученных результатов. В ряде случаев для оценки точности разработанных приближенных подходов применялись имитационные модели.

Достоверности и новизна результатов диссертации

Проведенный анализ диссертации позволяет констатировать высокий уровень научной новизны и достоверность полученных результатов. Научная новизна состоит в том, что:

1. Разработан свёрточный алгоритм расчета вероятностных характеристик ресурсных систем массового обслуживания с пуассоновским входящим потоком и дискретными требованиями к ресурсу.
2. Доказана свойство нечувствительности стационарного распределения ресурсной системы с пуассоновским входящим потоком к виду функции распределения времени обслуживания. Ключевая особенность рассматриваемой системы заключается в том, что интенсивности поступления и обслуживания зависят от текущего состояния системы. Ранее аналогичное свойство было установлено для ресурсных систем с постоянными интенсивностями поступления и обслуживания.

3. Разработана новая модель ресурсной системы массового обслуживания с сигналами. В рамках модели при поступлении сигнала заявка изменяет требуемый объём ресурсов. В отличие от предыдущих ресурсных систем, новая модель учитывает возможность потери заявки при поступлении сигнала, что позволяет моделировать реальные сценарии отказов или прерываний в работе системы.
4. Разработан метод приближённого анализа ресурсной системы массового обслуживания с сигналами. Метод базируется на использовании имитирующей ресурсной системы без сигналов, что позволяет использовать полученные ранее аналитические результаты. Для расчёта вероятности прерывания применяется распределение по цепи Маркова, вложенной по моментам окончания обслуживания.
5. Продемонстрировано применение ресурсных СМО для анализа беспроводных сетей пятого и последующих поколений, что позволило учесть при расчёте показателей эффективности их ключевые особенности:
 - механизмы выделения радиоресурсов, зависящие от используемой кодово-модуляционной схемы;
 - подвижность пользовательских устройств;
 - возникновение блокировок прямого пути распространения сигнала в сетях миллиметрового диапазона частот и связанная с ними нестабильность радиоканала;
 - механизмы резервирования ресурсов, мультисвязности и выгрузки трафика, направленные на повышение показателей непрерывности сессий передачи данных и увеличение ёмкости сети.

Достоверность полученных результатов обеспечивается корректной методологической основой, базирующейся на строгом математическом аппарате теории марковских процессов, теории массового обслуживания и математической теории телетрафика, качественным совпадением частных случаев с известными классическими результатами, широкой апробацией на более 40 международных конференциях и публикационной активностью.

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

Научные положения и выводы, представленные в диссертационной работе, характеризуются высокой степенью обоснованности, достигаемой за счет методологической строгости исследования. Методологическая обоснованность обеспечивается последовательным применением современного математического аппарата. Строгость математического

обоснования подтверждается корректным доказательством теорем и лемм. Все утверждения сформулированы строго, преобразования и выкладки не содержат ошибок. Проведены численные эксперименты. В ряде случаев для оценки точности приближенных методов были проведены сравнения с имитационными моделями. Таким образом, представленные в диссертации научные положения, выводы и рекомендации являются полностью обоснованными.

Ценность для науки и практики результатов работы

Результаты диссертационного исследования обладают значительной ценностью как для фундаментальной науки, так и для прикладных областей телекоммуникационной отрасли, что проявляется в следующих аспектах.

Научная ценность работы заключается в существенном вкладе в развитие математической теории телетрафика и теории массового обслуживания, в особенности в теорию ресурсных систем массового обслуживания. Разработан ряд новых моделей, доказаны их фундаментальные свойства, предложены точные и приближенные методы расчета их вероятностно-временных характеристик.

Практическая ценность результатов подтверждается их прямой ориентированностью на решение актуальных задач телекоммуникационной отрасли. В диссертации разработана единая методология анализа показателей эффективности современных сетей радиодоступа, включая метод описания параметров сценария функционирования сети и особенностей технологии с помощью распределения требований к ресурсу, а также вычислительные алгоритмы. Разработанные модели и алгоритмы представляют собой эффективный инструментарий для инженеров и проектировщиков телекоммуникационных систем, позволяющий проводить количественную оценку показателей качества обслуживания на этапе планирования сети. Результаты работы имеют непосредственное приложение к технологиям сетей 5G/6G, затронуты особенности использования частот миллиметровых длин волн, аспекты множественного подключения мобильных устройств к нескольким базовым станциям и использование нелицензированных диапазонов частот для повышения емкости сети. Дополнительным свидетельством практической ценности работы является внедрение результатов в учебный процесс РУДН, что способствует подготовке высококвалифицированных кадров в области информационных технологий и телекоммуникаций.

Подтверждение опубликования основных результатов диссертации в научной печати

Основные научные результаты и положения диссертационной работы Сопина Э.С. получили широкое освещение в научной печати. Всего по теме диссертации опубликовано 85 работ, включая 50 публикаций в изданиях, индексируемых в международных базах данных Web of Science и Scopus, В том числе в высокорейтинговых журналах «IEEE Communications Surveys & Tutorials», «IEEE Transactions on Wireless Communications», «IEEE Transactions on Vehicular Technology», «Mathematics», 8 работ в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в RSCI, 1 работу в рецензируемом научном издании из Перечня ВАК РФ, 15 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ, 2 монографии и 3 учебных пособия. Временной охват и репрезентативность публикаций охватывают период с 2014 по 2025 год. Таким образом, публикационная активность диссертанта является достаточной и характеризуется высоким качеством изданий, полным соответствием содержания публикаций основным положениям, выносимым на защиту.

Соответствие содержания автореферата основным положениям диссертации

Проведенный анализ содержания автореферата диссертации Сопина Э.С. позволяет констатировать его полное соответствие основным положениям и выводам, представленным в полном тексте диссертационной работы. Полнота отражения содержания диссертации обеспечивается за счет точного и последовательного изложения всех ключевых элементов исследования. Несовпадений между содержанием автореферата и основным текстом диссертации не выявлено.

Замечания по работе

1. Следовало более детально описать имитационные модели, разработанные в главах 4 и 5, а также указать доверительные интервалы на графиках, полученных с их помощью.
2. В работе имеется ряд опечаток и стилистических неточностей.

Заключение

Диссертационное исследование Сопина Эдуарда Сергеевича является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной проблемы разработки математического и вычислительного

аппарата для анализа показателей эффективности перспективных сетей радиодоступа, имеющей важное значение для повышения эффективности использования радиочастотного спектра и обеспечения качества обслуживания в сетях 5G/6G. 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 Степанов Сергей Николаевич, доктор технических наук (на стыке 05.25.01 — Теоретические основы информатики, 05.12.14 — Сети, узлы связи и распределение информации), профессор, заведующий кафедрой Интеллектуальные сетевые и облачные технологии ордена Трудового Красного Знамени федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский технический университет связи и информатики», тел.: +7 (495) 957-77-99, доб. 665, e-mail: s.n.stepanov@mtuci.ru



Степанов Сергей Николаевич

Подпись руки Степанова С.Н. заверено
Ученый секретарь Ученого совета МТУСИ
кандидат биологических наук, доцент



В.В. Ерофеева

Ордена Трудового Красного Знамени федеральное Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский технический университет связи и информатики»

Адрес: 111024 Москва, ул. Авиамоторная, д. 8а

Тел.: +7 (495) 957-77-31. Факс: +7 (495) 925-04-35. E-mail: kanc@mtuci.ru

Страница в интернете: <https://mtuci.ru>