

Канищева Маргарита Геннадьевна

**Разработка модели и процедур эффективного
распределения ресурса мультисервисных узлов доступа
при обслуживании гетерогенного трафика современных
коммуникационных приложений**

Специальность 2.2.15 —
Системы, сети и устройства телекоммуникаций

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва — 2025 г.

Работа выполнена в Ордена Трудового Красного Знамени федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский технический университет связи и информатики» (МТУСИ)

Научный руководитель:	Степанов Сергей Николаевич - доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Сети связи и системы коммутации» МТУСИ
Официальные оппоненты:	Росляков Александр Владимирович, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Сети и системы связи» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Поволжский государственный университет связи и информатики» (ФГБОУ ВО ПГУТИ), Кочеткова Ирина Андреевна, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры «Теория вероятностей и кибербезопасность» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы» (ФГАОУ ВО РУДН),
Ведущая организация:	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича» (ФГБОУ ВО СПбГУТ)

Защита состоится «18» сентября 2025 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета по защите докторских и кандидатских диссертаций 55.2.002.01 при Ордена Трудового Красного Знамени федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский технический университет связи и информатики» по адресу: 111024, г. Москва, ул. Авиамоторная, д. 8а, МТУСИ, аудитория А-211.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте МТУСИ: https://dis.mtuci.ru/upload/srd/Dis-Kanisheva/dis_Kanisheva.pdf.

Автореферат разослан “ ____ ” _____ 2025 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета 55.2.002.01

доктор технических наук, доцент Максим Валерьевич Терешонок

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Развитие современных телекоммуникаций направлено на создание условий по качественному обслуживанию информационной нагрузки, создаваемой разнообразными пользователями услуг связи, большая часть которых — это технические устройства, предназначенные для сбора и передачи данных наблюдений. Информационные потоки, порожденные действующими и перспективными коммуникационными приложениями, характеризуются разными требованиями к скорости передачи, импульсным характером поступления сообщений, разной степенью терпимости к задержке, наличием или отсутствием свойства эластичности и т.д. Перечисленные особенности формирования и обслуживания поступающих заявок необходимо учитывать в процессе реализации новых телекоммуникационных технологий и концепций. В противном случае, как показали результаты статистических измерений и моделирования сетей связи, возникают проблемы с качеством предоставления услуг.

Отмеченные свойства создания и пересылки информационной нагрузки исследуются с помощью мультисервисных моделей. Они представляют большой интерес для практики и активно изучаются специалистами в области связи. Для обоснованного решения задачи планирования ресурса передачи информации узлов доступа и анализа условий дифференцированного обслуживания гетерогенной нагрузки необходимо построить новые математические модели, учитывающие рассмотренные выше особенности генерации информационных потоков, и провести их математический анализ с целью разработки эффективных точных и приближенных методов вычисления характеристик качества обслуживания поступающих запросов. Данные вопросы исследуются в работе Канищевой М.Г., что подтверждает актуальность темы, а также теоретическую и практическую ценность результатов.

Степень разработанности темы. Задачам оценки характеристик качества обслуживания поступающих запросов в разнообразных системах связи посвящены работы российских и зарубежных авторов. В их числе: Г.П. Башарин, В.М. Вишневский, Ю.В. Гайдамака, В.Г. Карташевский, И.А. Кочеткова, А.Е. Кучерявый, Е.А. Кучерявый, В.А. Наумов, А.П. Пшеничников, А.В. Росляков, К.Е. Самуйлов, С.Н. Степанов, М.С. Степанов, И.И. Цитович, и др., а также – T.Bonald, F.P. Kelly, V.B. Iversen, K.W. Ross, J. Virtamo и др. В ряде диссертационных исследований, таких как работы С.Д. Андреева, В.О. Бегишева, Е.А. Кучерявого, К.А. Агеева, Ж. Ндайикунда и других, рассматривались отдельные аспекты моделирования и анализа процессов генерации и обработки заявок в беспроводных узлах доступа. Предыдущие научные изыскания по данной тематике либо имеют чересчур завышенную теоретическую направленность, что затрудняет использование полученных результатов на практике, либо являются инженерными разработками, базирующимися на эмпирических результатах, что делает невозможным их применение

при изменении параметров решаемой задачи. В рамках данного исследования предлагается использовать многомерные марковские процессы для построения модели распределения ресурса и технику декомпозиции модели на отдельные модули для построения приближенных алгоритмов оценки характеристик обслуживания поступающих потоков трафика.

Цель работы. Построение обобщенной модели обслуживания в беспроводном узле доступа мультисервисного трафика современных коммуникационных приложений с учетом гетерогенных свойств поступающей нагрузки и импульсного характера формирования трафика данных.

Научная задача исследования заключается в обосновании возможности решения задачи планирования требуемой пропускной способности мультисервисного узла доступа, а также в разработке процедур дифференцированного обслуживания поступающих информационных потоков с учетом перечисленных выше особенностей их формирования и распределения пропускной способности узла доступа.

Для реализации поставленной цели и решения научной задачи требуется выполнить ряд взаимосвязанных частных исследований:

- разработать и проанализировать модель совместной обработки в беспроводном узле доступа приоритетного трафика онлайн-услуг и файловых данных с переменной скоростью передачи, учитывающую импульсный характер поступления файлов, а также возможность задержек и снижения актуальности передаваемой информации;
- на основе предложенной модели оценить ключевые параметры качества обслуживания поступающих запросов;
- разработать точные и приближенные методы вычисления полученных характеристик;
- сформировать практические рекомендации по эффективному распределению пропускной способности узла доступа между разнородными потоками трафика.

Объект исследования — беспроводной узел доступа, работающий в сети LTE¹.

Предмет исследования — алгоритмы распределения пропускной способности узла между обслуживаемыми информационными потоками.

Научная новизна.

1. Разработана и исследована комплексная модель совместного обслуживания разнородного трафика в беспроводном узле доступа. В отличие от существующих аналогов, данная модель позволяет учитывать ключевые

¹ Данное допущение не носит принципиального характера. Также могут рассматриваться узлы доступа стандартов 5G и 6G.

особенности формирования и передачи данных, характерные для современных и перспективных коммуникационных сервисов. К таким особенностям относятся: зависимость скорости передачи от типа запроса, приоритетность нагрузки онлайн-услуг, возможность поступления файлов группами случайного размера, наличие или отсутствие у файлов эластичных свойств, присутствие у файлов возможности ожидания начала передачи и утраты ценности передаваемой информации с течением времени.

2. С помощью построенной математической модели узла получены выражения для оценки основных характеристик совместной передачи поступающих информационных потоков. Это доля запросов, получивших отказ, средний объем использованного ресурса передачи информации, среднее время передачи файла, среднее число файлов, ожидающих начала передачи. В отличие от более ранних исследований полученные выражения позволяют изучить действие учтенных в модели особенностей формирования потоков заявок и их обслуживания на решение задачи планирования ресурса и создание условий по их дифференцированному обслуживанию.
3. Стационарные вероятности модели и связанные с ними характеристики можно определить, решая систему уравнений баланса. В отличие от стандартных методов решения этой задачи, разработанный в диссертации алгоритм на основе метода последовательных замещений Гаусса-Зейделя позволяет рассчитывать характеристики моделей, включающих до нескольких миллионов состояний.
4. Для приближенной оценки характеристик узла предложена процедура декомпозиции модели на две составляющие. В каждой из них рассматривается по отдельности процесс обслуживания трафика сервисов реального времени и пересылка эластичного трафика файлов. В отличие от предыдущих исследований, расчет параметров обслуживания входящих запросов можно проводить с использованием несложных рекуррентных формул, применимых при любых значениях структурных параметров. Алгоритм ориентирован на реализацию в области малых потерь, где решается задача планирования требуемой пропускной способности узла доступа.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая ценность исследования состоит в разработке и анализе комплексной модели обработки мультисервисного трафика современных приложений в беспроводном узле доступа с учетом гетерогенных свойств поступающей нагрузки и импульсного характера формирования трафика данных, а также в разработке алгоритмов расчета характеристик обслуживания заявок в подобных моделях. Практическая значимость работы заключается в обосновании возможности решения задачи планирования требуемой пропускной способности

мультисервисного узла доступа, а также в разработке процедур дифференцированного обслуживания поступающих информационных потоков с учетом перечисленных выше особенностей их формирования и распределения ресурса передачи информации. Основные результаты диссертации получены при выполнении ряда НИР, включенных в результате конкурсного отбора в проектную часть тематического плана научных исследований МТУСИ в 2022–2025 гг, где автор был исполнителем. Результаты диссертации использованы в учебном процессе на кафедре «Сети связи и системы коммутации» МТУСИ и внедрены в компаниях ООО «ЕПСКОМ», ЗАО «Испытательный центр МирТелеТест». Реализация результатов работы подтверждена соответствующими актами.

Методология и методы исследования. Для решения поставленной задачи применялись методы теории вероятностей, вычислительной математики и математического моделирования.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Построенная комплексная модель мультисервисного беспроводного узла доступа дает возможность решить задачу планирования требуемой пропускной способности узла с учетом гетерогенных свойств поступающей нагрузки и импульсного характера поступления файлов.
2. Разработанная алгоритмическая версия итерационного метода Гаусса-Зейделя позволяет расширить возможности оценки значений стационарных вероятностей состояний построенной модели узла доступа, а с ними и точных величин характеристик обслуживания поступающих заявок для моделей с числом состояний до нескольких миллионов.
3. Для приближенного решения задачи планирования ресурса узла доступа предлагается использовать процедуру декомпозиции модели на две составляющие. В каждой из них рассматривается по отдельности процесс обслуживания трафика сервисов реального времени и пересылка эластичного трафика файлов. В каждом конкретном случае вычисление характеристик возможно на основе несложных рекурсивных формул при любых заданных структурных параметрах модели.
4. Расчеты с использованием модели показали, что групповой характер поступления файлов увеличивает требование к ресурсу передачи необходимо для обслуживания поступающих потоков заявок с заданным качеством. Игнорирование импульсных свойств потока данных может внести ошибку в оценку ресурса, достигающую трети итогового значения пропускной способности узла.
5. Показано, что в ситуации перегрузки условия по дифференцированному обслуживанию эластичного трафика можно создать на общем ресурсе без увеличения пропускной способности узла доступа, если воспользоваться возможностью ожидания файлов или их выгрузки на другие узлы. В зависимости от значений входных параметров экономия в требуе-

мой величине пропускной способности достигает 10%–20% по сравнению с использованием традиционной модели слайсинга.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Специальность диссертационной работы — 2.2.15 Системы, сети и устройства телекоммуникаций. Работа соответствует пунктам паспорта 1, 2 и 6 указанной специальности.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность результатов диссертации обеспечивается корректностью используемого математического аппарата теории телетрафика и подтверждена численными экспериментами. Результаты работы обсуждались и докладывались на Международной научной конференции «Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications» (Москва, 2022-2024 гг.), на международной научной конференции «Distributed Computer and Communication Networks: Control, Computation, Communications» (Москва, 2024 г), на отраслевой научно-технической конференции «Телекоммуникационные и вычислительные системы» (Москва, 2022 - 2023 гг); на научных семинарах кафедры «Сети связи и системы коммутации». Основные результаты диссертации изложены в 16 опубликованных работах. В их числе 6 работ в изданиях, входящих международную базу цитирования WoS и SCOPUS, 3 работы в изданиях, включенных в список ВАК РФ, 3 работы в изданиях, входящих в базу РИНЦ, и 4 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ (Роспатент).

Основное содержание работы. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка литературы и приложения. Основная часть (без приложения) изложена на 124 страницах машинописного текста, содержит 43 рисунка и 10 таблиц; список литературы состоит из 128 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснованы выбор темы диссертации, ее актуальность, научная новизна, перечислены цели и основные задачи исследования, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первом разделе диссертации обсуждаются основные структурные параметры сетей мобильной связи на базе стандарта LTE и его дальнейшего развития, рассмотрено их влияние на обеспечение заданного качества обслуживания трафика современных коммуникационных приложений. Важнейшей характеристикой мультисервисного узла доступа является значение пропускной способности. Исследуется зависимость этой характеристики от типа соединения (Uplink, Downlink), от величины выделенной полосы передачи, от применяемых технологий доступа FDD и TDD, от типа модуляции, от алгоритма кодирования, от использования антенных технологий MIMO, от загрузки узла и типов предоставляемых сервисов и т.д. Сформулирована и обсуждается характеристика новых концепций и бизнес-моделей, используе-

мых в узлах доступа, для создания условий по качественному обслуживанию возникающих требований. Среди них: интернет вещей, сетевая нарезка, операторы систем наблюдения. Показано, что успешная реализация новых концепций развертывания сетей и управления распределением пропускной способности между поступающими заявками требует построения новых моделей мультисервисных узлов доступа, в которых учитывается совокупное влияние основных значимых факторов, влияющих на формирования входных потоков заявок и их обслуживание. Среди них: совместная передача трафика реального времени и данных, наличие приоритета у трафика сервисов реального времени, эластичные свойства данных и импульсный характер их поступление, возможности ожидания и старения передаваемой информации и т.д. В противном случае, как показали результаты измерений и моделирования телекоммуникационных сетей, возникают проблемы с качеством предоставления услуг.

Второй раздел диссертации посвящен исследованию процесса совместного обслуживания гетерогенного трафика современных коммуникационных приложений в беспроводных узлах доступа. Предполагается, что узел доступа представляет из себя изолированную соту сети стандарта LTE, часть ресурса которого или весь ресурс арендуется оператором систем наблюдения для передачи информационных потоков, инициируемых видеокамерами и разного рода датчиками телеметрии. Выделение необходимого объема ресурса передачи информации осуществляется разными средствами, например с использованием архитектуры Network Slicing.

Обозначим через C пропускную способность узла доступа, выраженную в битах в секунду, а через c обозначим скорость передачи одного виртуального канала. Узел доступа обслуживает пуассоновский поток заявок на передачу трафика сервисов реального времени. Обозначим интенсивность поступления заявок через λ_r . Поступающие заявки разделены на n сервисных категорий. С вероятностью $p_{r,k}$ заявка принадлежит k -й категории, требует для своего обслуживания ресурс передачи информации в размере c_k бит в секунду и занимает ресурс в течение случайного времени, имеющего экспоненциальное распределение с параметром $\alpha_{r,k}$, $k = 1, \dots, n$. Для удобства моделирования величины C и c_k необходимо перевести в формат виртуальных каналов (в.к.). Обозначим через v общее число каналов, которые обеспечиваются пропускной способностью узла. Величина v находится из соотношения $v = \lfloor \frac{C}{c} \rfloor$ в.к. Обозначим через b_k число виртуальных каналов, требуемых для обслуживания одной заявки k -го потока. Величина b_k определяется из выражения $b_k = \lceil \frac{c_k}{c} \rceil$ в.к. Заявки k -го потока формируют пуассоновский поток интенсивности $\lambda_{r,k} = \lambda_r p_{r,k}$, $k = 1, \dots, n$.

Совместно с обслуживанием информационных потоков, инициированных предоставлением сервисов реального времени, узел доступа осуществляет передачу пуассоновского группового потока эластичных данных в форме файлов. Обозначим через λ_d интенсивность потока. Поступление каждой заявки

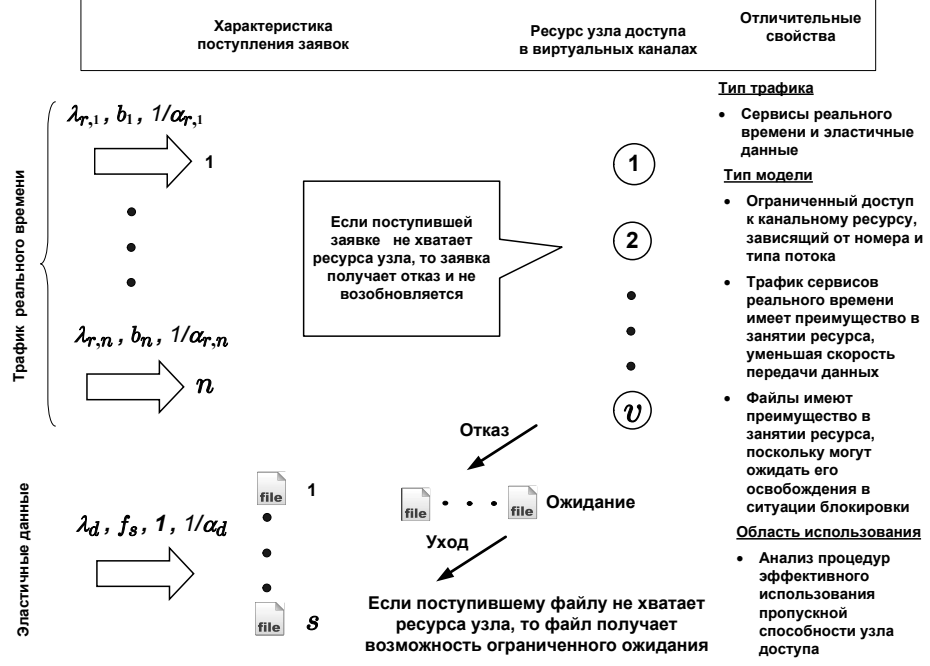


Рисунок 2 — Математическая модель узла доступа

в узле доступа; средним числом виртуальных каналов b_f , используемых для передачи одного файла; средним числом файлов L_q , находящихся на ожидании; средним числом файлов L , находящихся на ожидании и обслуживании.

Определим введенные характеристики через значения стационарных вероятностей $p(i_{r,1}, \dots, i_{r,n}, i_d)$ всех состояний модели $(i_{r,1}, \dots, i_{r,n}, i_d) \in S$. Обозначим для состояния $(i_{r,1}, \dots, i_{r,n}, i_d)$ через ℓ число виртуальных каналов, занятых на обслуживании трафика сервисов реального времени $\ell = i_{r,1}b_1 + \dots + i_{r,n}b_n$ и предположим, что максимальное число файлов m_g в поступившей группе не превосходит $v + w$. Формальные выражения для введенных выше характеристик через значения стационарных вероятностей $p(i_{r,1}, \dots, i_{r,n}, i_d)$ марковского процесса $r(t)$ имеют вид:

$$\pi_{r,k} = \sum_{\{(i_{r,1}, \dots, i_{r,n}, i_d) \in S \mid \ell + i_d + b_k > v\}} p(i_{r,1}, \dots, i_{r,n}, i_d);$$

$$m_{r,k} = \sum_{(i_{r,1}, \dots, i_{r,n}, i_d) \in S} p(i_{r,1}, \dots, i_{r,n}, i_d) i_{r,k} b_k; \quad k = 1, \dots, n.$$

Для оценки π_d необходимо поделить интенсивность потерянных по всем причинам файлов на интенсивность поступивших файлов

$$\pi_d = \frac{1}{\lambda_d \bar{b}} \left(\Lambda_b + \sum_{\{(i_{r,1}, \dots, i_{r,n}, i_d) \in S \mid \ell + i_d > v\}} p(i_{r,1}, \dots, i_{r,n}, i_d) (\ell + i_d - v) \sigma \right),$$

где

$$\Lambda_b = \lambda_d \sum_{i=0}^{i_d} \sum_{\{(i_{r,1}, \dots, i_{r,n}, i_d) \in S \mid \ell + i_d = v + w\}} p(i_{r,1}, \dots, i_{r,n}, i_d - i) \sum_{s=i+1}^{v+w} f_s(s - i).$$

Оставшиеся характеристики качества обслуживания файлов определяются из следующих выражений

$$\begin{aligned} m_d &= \sum_{\{(i_{r,1}, \dots, i_{r,n}, i_d) \in S \mid i_d > 0\}} p(i_{r,1}, \dots, i_{r,n}, i_d)(v - \ell); \\ L_q &= \sum_{\{(i_{r,1}, \dots, i_{r,n}, i_d) \in S \mid \ell + i_d > v\}} p(i_{r,1}, \dots, i_{r,n}, i_d)(\ell + i_d - v); \\ L &= \sum_{\{(i_{r,1}, \dots, i_{r,n}, i_d) \in S\}} p(i_{r,1}, \dots, i_{r,n}, i_d)i_d; \quad h_d = \frac{L}{\lambda_d \bar{b}(1 - \pi_{d,c})}, \quad b_f = \frac{m_d}{L - L_q}. \end{aligned}$$

Для оценки $p(i_{r,1}, \dots, i_{r,n}, i_d)$ и введенных характеристик необходимо решить систему уравнений равновесия, которая формируется циклически в соответствии с (1). Получаем такое выражение

$$\begin{aligned} &P(i_{r,1}, \dots, i_{r,n}, i_d) \left\{ \sum_{k=1}^n \left(\lambda_{r,k} I(\ell + i_d + b_k \leq v) + i_{r,k} \alpha_{r,k} I(i_{r,k} > 0) \right) + \right. \\ &+ \lambda_d I(\ell + i_d + 1 \leq v + w) + (v - \ell) \alpha_d I(i_d > 0) + (\ell + i_d - v) \sigma I(\ell + i_d > v) \left. \right\} = \\ &= \sum_{k=1}^n P(i_{r,1}, \dots, i_{r,k} - 1, \dots, i_{r,n}, i_d) \lambda_{r,k} I(i_{r,k} > 0, \ell + i_d \leq v) + \\ &+ \sum_{i=1}^{i_d} P(i_{r,1}, \dots, i_{r,n}, i_d - i) \lambda_d \left(f_i + I(\ell + i_d = v + w) \sum_{j=i+1}^{v+w} f_j \right) + \\ &+ \sum_{k=1}^n P(i_{r,1}, \dots, i_{r,k} + 1, \dots, i_{r,n}, i_d) (i_{r,k} + 1) \alpha_{r,k} \times \\ &\times \left(I(\ell + b_k + i_d \leq v) + I(\ell + b_k + i_d > v, \ell + b_k \leq v, \ell + b_k + i_d \leq v + w) \right) + \\ &+ P(i_{r,1}, \dots, i_{r,n}, i_d + 1) \times \left((v - \ell) \alpha_d I(\ell + i_d + 1 \leq v + w) + \right. \\ &\left. + (\ell + i_d + 1 - v) \sigma I(\ell + i_d + 1 \leq v + w, \ell + i_d + 1 > v) \right). \end{aligned}$$

Здесь $I(\cdot)$ индикаторная функция и для значений $P(i_{r,1}, \dots, i_{r,n}, i_d)$ выполнено условие нормировки.

Третий раздел диссертации посвящен изложению точных и приближенных алгоритмов оценки введенных показателей совместного обслуживания поступающих заявок. Значения характеристик находятся из решения системы уравнений равновесия методами вычислительной математики, в частности, итерационным методом Гаусса-Зейделя. Формулировка метода и перечень процедур, повышающих эффективность его использования, приведены в разделе 3. В ряде частных случаев исследуемой модели удалось получить эффективные расчетные алгоритмы, которые позволяют вести оценку характеристик с использованием рекурсий по числу занятых единиц ресурса. Эти результаты получены для моделей, в которых процесс обслуживания ограничен только трафиком реального времени, только эластичным трафиком и только совместным обслуживанием всех видов трафика по правилам сервисов реального времени. Показано, что пересылка файлов по правилам трафика сервисов реального времени только на основе ресурса одного канала приводит к оценкам сверху для характеристик исходной модели. Этот результат будет использован для обоснования процедур планирования необходимой производительности узла доступа.

Приведем расчетные выражения для передачи эластичных данных. Пусть в узле доступа передаются только файлы и $p(j)$ — доля времени пребывания на обслуживании и ожидании j файлов. Тогда значения $p(j)$ находятся с использованием рекурсии

$$p(j) = \frac{\lambda}{v\mu_d + (j - v)\sigma I(j > v)} \times \\ \times \left(p(0) \sum_{i=j}^{v+w} f_i + p(1) \sum_{i=j-1}^{v+w} f_i + \dots + p(j-1) \sum_{i=1}^{v+w} f_i \right), \quad j = 0, 1, \dots, v + w.$$

Приведем выражение для оценки доли потерянных файлов

$$\pi_d = \frac{1}{\lambda b} \left(\lambda \sum_{i=1}^{v+w} p(i) \sum_{k=0}^{i-1} f_{v+w-k}(i - k) + \sum_{i=v+1}^{v+w} p(i)(i - v)\sigma \right).$$

Остальные характеристики определяются аналогичным образом.

Для приближенной оценки характеристик узла предложена процедура декомпозиции модели на две составляющие. В каждой из них рассматривается по отдельности процесс обслуживания трафика сервисов реального времени и пересылка эластичного трафика файлов. Область применения предложенной расчетной процедуры — оценка характеристик передачи эластичных файлов при решении задачи планирования необходимого объема ресурса узла доступа. Поскольку задача планирования решается в области малых потерь, то для оценки среднего времени передачи файла предлагается поступить следующим образом. Вначале оценивается m_r число виртуальных каналов, которые занимает трафик сервисов реального времени. Затем оцениваются характеристики передачи эластичного трафика на числе каналов $\lfloor v - m_r \rfloor$, оставшихся

свободными после обслуживания трафика сервисов реального времени. Понятно, что чем меньше будут потери заявок на передачу трафика сервисов реального времени, тем точнее будет используемая аппроксимация. Показано, что для потерь порядка 0,01–0,05 погрешность оценки составляет 10%–20%. Построена и численно исследована процедура оценки нагрузки, где можно использовать рассмотренную процедуру декомпозиции. Для этого применяется модель узла, обеспечивающая верхний характер оценок потерь заявок.

Приведем численный пример, иллюстрирующий использование приближенного алгоритма. Входные параметры: $C = 100$ Мбит/с; $n = 2$; $c_1 = 5$ Мбит/с; $c_2 = 10$ Мбит/с; $c = 1$ Мбит/с; $F = 1$ Мбит. Из принятых допущений: $v = 100$ в.к.; $b_1 = 5$ в.к.; $b_2 = 10$ в.к.; $1/\alpha_d = 1$ с. При выполнении вычислений это время будет принято за единицу. Отсюда $\alpha_d = 1$. Другие параметры: $\alpha_{r,1} = 0,1$; $\alpha_{r,2} = 0,1$; $f_s = 1/30$, $s = 1, 2, \dots, 30$ ($\bar{b} = 15,5$); $w = 10$; $\sigma = 0,1$. Значения интенсивностей: $\lambda_{r,1} = v\rho\alpha_{r,1}/3b_1$; $\lambda_{r,2} = v\rho\alpha_{r,2}/3b_2$; $\lambda_d = v\rho\alpha_d/3\bar{b}$, где ρ — предложенный трафик на один в.к.

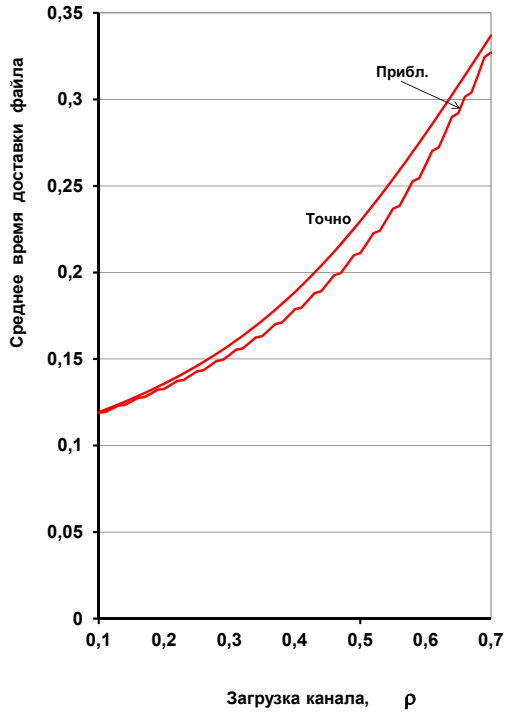


Рисунок 3. Зависимость точного и приближенного расчета h_d от ρ

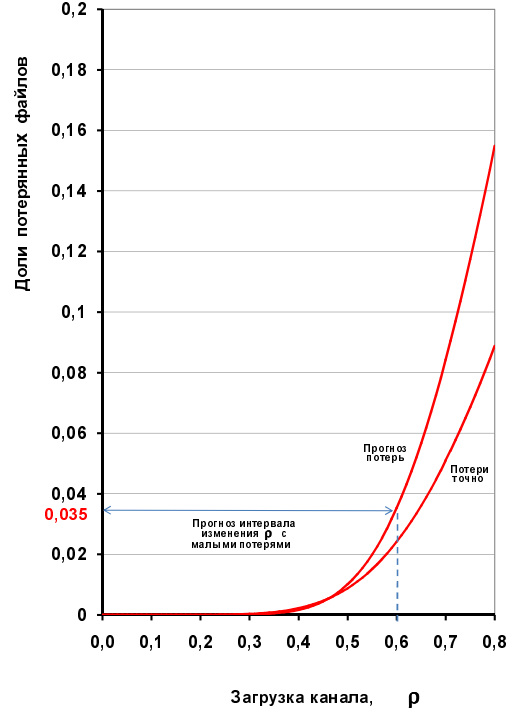


Рисунок 4. Прогноз интервала изменения ρ с малыми (на уровне 0,035) потерями

На рисунке 3 показано изменение h_d , найденное точно и приближено в результате реализации рекурсии, полученной для мультисервисной модели Эрланга, но без учета потока эластичных данных. Ступенчатый характер кривых связан с целочисленным округлением m_r . Результаты вычислений говорят о хорошей точности расчетной процедуры особенно в области малых потерь, которая соответствует характеристикам обслуживания заявок используемым при решении задач планирования. Эти величины соответствуют значениям максимальных потерь на уровне 0,01–0,05.

Четвертый раздел диссертации посвящен вопросам оценки пропускной способности мультисервисного узла доступа в зависимости от особенностей формирования нагрузки. Выполнен анализ влияния неоднородности входных потоков на оценку пропускной способности узла доступа. Результаты анализа зависят от нагрузки и от используемых сценариев формирования потоков заявок и распределения ресурса передачи информации, но во всех исследованных случаях легкий трафик вытесняет из обслуживания тяжелый трафик. Наиболее сильно влияют на значения характеристик наличие ожидания и групповой характер поступления файлов. В первом случае по сравнению с основной моделью увеличивается доля файлов, попавших на обслуживание, что ведет к более сильному вытеснению тяжелого трафика легким трафиком. Во втором случае по сравнению с основной моделью увеличивается доля потерь файлов, что позволяет отчасти уменьшить потери заявок на передачу трафика реального времени и увеличить коэффициент занятия канала этим типом трафика.

Использование дисциплины Processor Sharing уменьшает долю файлов, находящихся на обслуживании. Это увеличивает шансы трафика сервисов реального времени попасть на обслуживание. В результате у подобных заявок уменьшаются потери и увеличивается коэффициент использования канала. Это ведет к увеличению потерь заявок на передачу файлов и уменьшению коэффициента использования канала. В целом давая оценку анализируемым факторам отметим, что наличие неоднородности в совместно обслуживаемых потоках трафика и групповой характер поступления файлов увеличивают требование к ресурсу передачи достаточному для обслуживания поступающих потоков заявок с заданным качеством. В тоже время использование ожидания и дисциплины распределения ресурса Processor Sharing уменьшают требование к ресурсу. Полученные изменения в значениях характеристик можно оценить с использованием построенной модели и разработанных на ее основе алгоритмов.

Условия по дифференцированному обслуживанию информационных потоков в узле доступа можно создать разными способами. Наиболее простой сценарий — это воспользоваться возможностями, которые предоставляет архитектура Network Slicing. Положительные моменты этого решения — это использование относительно простых моделей и алгоритмов расчета характеристик обслуживания трафика в отдельных слайсах. Отрицательные — избыточные объемы ресурса передачи информации и, как следствие, его неэффективное использование.

Другие возможности по дифференцированному обслуживанию трафика заключаются в контроле за доступом поступающих заявок. Контроль может быть организован за счет использования возможности ожидания или осуществления выгрузки отдельных видов заявок в другие узлы доступа или в другие более доступные диапазоны частот. Оценка условий реализации перечисленных возможностей может быть осуществлена с помощью построенных

моделей и разработанных на их основе алгоритмов оценки показателей качества обслуживания поступающих информационных потоков.

Сформулирована процедура оценки необходимой по нагрузке и качеству обслуживания величины пропускной способности узла доступа. Оценка необходимого объема ресурса осуществляется методом перебора, начиная с некоторого минимального значения, которое определяется после анализа входных параметров поступающих информационных потоков. Далее с использованием точного или приближенного алгоритма оценивается значение применяемого в расчетах функционала качества обслуживания поступающих заявок и реализуется процесс выбора требуемого значения пропускной способности узла доступа. Приближенный подход основан на частных случаях построенной модели узла доступа. С вычислительной точки зрения он значительно эффективнее. Погрешность оценки составляет примерно 10%–20%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты работы состоят в следующем:

1. Разработана и исследована комплексная модель совместного обслуживания разнородного трафика в беспроводном узле доступа. В отличие от существующих аналогов, данная модель позволяет учитывать ключевые особенности формирования и передачи данных, характерные для современных и перспективных коммуникационных сервисов. К таким особенностям относятся: зависимость скорости передачи от типа запроса, приоритетность нагрузки онлайн-услуг, возможность поступления файлов группами случайного размера, наличие или отсутствие у файлов эластичных свойств, присутствие у файлов возможности ожидания начала передачи и утраты ценности передаваемой информации с течением времени.
2. С помощью построенной математической модели узла получены выражения для оценки основных характеристик совместной передачи поступающих информационных потоков. Это доля запросов, получивших отказ, средний объем использованного ресурса передачи информации, среднее время передачи файла, среднее число файлов, ожидающих начала передачи. В отличие от более ранних исследований полученные выражения позволяют изучить действие учтенных в модели особенностей формирования потоков заявок и их обслуживания на решение задачи планирования ресурса и создание условий по их дифференцированному обслуживанию.
3. Стационарные вероятности модели и связанные с ними характеристики можно определить, решая систему уравнений баланса. В отличие от стандартных методов решения этой задачи, разработанный в диссертации алгоритм на основе метода последовательных замещений Гаусса-

Зейделя позволяет рассчитывать характеристики моделей, включающих до нескольких миллионов состояний.

4. Для приближенной оценки характеристик узла предложена процедура декомпозиции модели на две составляющие. В каждой из них рассматривается по отдельности процесс обслуживания трафика сервисов реального времени и пересылка эластичного трафика файлов. В отличие от предыдущих исследований, расчет параметров обслуживания входящих запросов можно проводить с использованием несложных рекуррентных формул, применимых при любых значениях структурных параметров. Алгоритм ориентирован на реализацию в области малых потерь, где решается задача планирования требуемой пропускной способности узла доступа. Показано, что для потерь порядка 0,01–0,05 погрешность оценки составляет 10%–20%. Построена и численно исследована процедура оценки нагрузки, где можно использовать рассмотренную процедуру декомпозиции. Для этого применяется модель узла, обеспечивающая верхний характер оценок потерь заявок.
5. Исследовано влияние учитываемых в модели особенностей формирования и обслуживания поступающих заявок на расчет величины требуемой пропускной способности узла доступа. В целом, давая оценку анализируемым факторам отметим, что наличие неоднородности в совместно обслуживаемых потоках трафика и групповой характер поступления файлов увеличивают требование к необходимой величине пропускной способности узла доступа достаточной для пересылки поступающих информационных потоков заданным качеством. В тоже время применение возможности ожидания для заблокированных заявок и использование дисциплины равномерного распределения ресурса Processor Sharing уменьшают требование к ресурсу. Отмеченные изменения в значениях характеристик можно оценить с использованием построенной модели и разработанных на ее основе алгоритмов. Так установлено, что игнорирование импульсного характера поступления файлов приводит к существенной (порядка одной трети от требуемого значения) ошибке в оценке необходимого объема ресурса.
6. Показано, что в ситуации перегрузки условия по дифференцированному обслуживанию эластичного трафика можно создать на общем ресурсе без увеличения пропускной способности узла доступа, если воспользоваться возможностью ожидания файлов или их выгрузки на другие узлы. Оценка условий реализации перечисленных возможностей может быть осуществлена с помощью построенных моделей и разработанных на их основе алгоритмов оценки показателей качества обслуживания поступающих информационных потоков.

Таким образом, в результате проведенных в диссертационной работе иссле-

дований, решена научная задача, имеющая значение для развития сетей связи, — построена и проанализирована комплексная модель мультисервисного беспроводного узла доступа, которая дает возможность решить задачу планирования необходимой по нагрузке пропускной способности узла, а также разработать и исследовать процедуры дифференцированного обслуживания поступающих информационных потоков с учетом их гетерогенных свойств и импульсного характера формирования трафика данных. Тем самым, цель диссертационного исследования достигнута.

Основные публикации по теме диссертации

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России

1. *U.M. Andrabi, S.N. Stepanov, J. Ndayikunda, M.G. Kanishcheva*. Cellular network resource distribution methods for the joint servicing of real-time multiservice traffic and grouped IoT traffic // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. — 2020. — Том 14. — №10. — С.61–69.
2. *Anrabi U.M., Kanishcheva M.G., Stepanov S.N.* Observation system resource planning in presence of access control based on volume of resource occupied by traffic flows // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. — 2022. — Том 16. — №8. — С.54–62.
3. *Бужин И.Г., Антонова В.М., Миронов Ю.Б., Антонова В.А., Корчагина А.С., Канищева М.Г.* Особенности классификации и фильтрации трафика сети передачи данных 6G // Труды МАИ. — 2021. — №121. — С.1–5.

Публикации в изданиях, индексируемых в МБД SCOPUS

1. *Stepanov M. S., Kanishcheva M. G., Malikova E. E., Ndayikunda J., Kайgorodov N. G.* The Development and Analysis of a Service Model for the Traffic of a Surveillance System Operator by a Dedicated Resource of an LTE Cell // 2022 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications. Moscow, Russia. — 2022. — С.1–6.
2. *Andrabi U.M., Stepanov S.N., Stepanov M.S., Kanishcheva M.G., Habins-huti F.X.* The model of conjoint servicing of real time and elastic traffic streams through processor sharing (PS) discipline with access control // 2021 International Conference Engineering and Telecommunication. Moscow, Russia. — 2021. — С.1–6.
3. *Stepanov S.N., Kanischeva M.G., Korotkova V.I., Pshenichnikov A.P.* Construction and analysis of a model of group receipt of IoT elastic data in a wireless access node // 2023 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications. Moscow, Russia. — 2023. — С.1–6.

4. *Stepanov M.S., Stepanov S.N., Kanischeva M.G., Kroshin F. S.* Analysis of Procedures for Joint Servicing of Multiservice Traffic in Access Nodes // Distributed computer and communication networks: control, computation, communications. — 2022. — С. 1–6.
5. *Galiaskarov D.F., Stepanov S.N., Nikolaychuk N.N., Pshenichnikov A.P., Kanischeva M.G.* Dynamic load balancing in data center // 2024 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications. Moscow, Russia. — 2024.
6. *Dawood T.Z., Stepanov M.S., Stepanov S.N., Kanishcheva M.G., Shishkin M.O.* The analysis of heterogeneous traffic servicing in the Cellular Internet of Things access node // сборник трудов международной конференции «Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов в инфокоммуникациях» СИНХРОИНФО. — 2024.

Публикации в изданиях, включенных в базу РИНЦ

1. *Канищева М.Г., Степанов С.Н.* Планирование ресурсов системы наблюдения при наличии контроля доступа на основе объема занимаемых ресурсов по транспортным потокам // Технологии информационного общества. Сборник трудов XXX Международной отраслевой научно-технической конференции «Технологии информационного общества». (20-21 марта 2022 г. Москва, МТУСИ). — М.: ИД МБА. — 2022. — С.107–113.
2. *Stepanov M.S., Stepanov S.N., Kanischeva M.G., Kroshin F.S.* Analysis of Procedures to Ensure the Required QoS Indicators in Multiservice Access Nodes // Distributed computer and communication networks: control, computation, communications — 2023.
3. *Степанов С.Н., Канищева М.Г.* Построение и анализ модели группового поступления данных IoT в беспроводном узле доступа // Труды международной научно-технической конференции «Телекоммуникационные и вычислительные системы — 2023» — М.: Горячая линия. — Телеком. — 2023. — С. 84–87.

Регистрация программ для ЭВМ

1. *С.Н. Степанов, М.С. Степанов, М.О. Шишкин, М.Г. Канищева; правообладатель: Ордена Трудового Красного Знамени федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования* Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020665367. Программа для оценки характеристик обслуживания гетерогенного трафика Интернета Вещей с контролем доступа. // Федеральная служба по интеллектуальной собственности (РОСПАТЕНТ). — 2020. Заявка № 2020664744 от 17.11.2020.

2. *М.Г.Канищева, М.С. Степанов, С.Н. Степанов, М.О. Шишкин; право-владелец: Ордена Трудового Красного Знамени федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023610805. Программа для оценки характеристик обслуживания гетерогенного трафика // Федеральная служба по интеллектуальной собственности (РОСПАТЕНТ). — 2023. Заявка № 2022686658 от 31.12.2022.*
3. *С.Н. Степанов, М.С. Степанов, М.О. Шишкин, М.Г. Канищева; право-владелец: Ордена Трудового Красного Знамени федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023688868. Программа для исследования процедур маршрутизации запросов на информационное обслуживание в справочных и ситуационных центрах, работающих в условиях перегрузки // Федеральная служба по интеллектуальной собственности (РОСПАТЕНТ). — 2023. Заявка № 2023688131 от 15.12.2023.*
4. *С.Н. Степанов, М.Г. Канищева, М.С. Степанов, М.О. Шишкин; право-владелец: Ордена Трудового Красного Знамени федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2024667400. Программа для оценки пропускной способности мультисервисного узла доступа // Федеральная служба по интеллектуальной собственности (РОСПАТЕНТ). — 2024. Заявка №2024666386 от 15.07.2024.*