

На правах рукописи

Макеева Елена Дмитриевна

**АНАЛИЗ ПРИОРИТЕТНОЙ СИСТЕМЫ
ОБСЛУЖИВАНИЯ ТРАФИКА С ЗАВИСИМЫМ
ЗАНЯТИЕМ РАДИОРЕСУРСОВ**

Специальность 1.2.3. Теоретическая информатика, кибернетика

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2024

Работа выполнена на кафедре теории вероятностей и кибербезопасности Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы»

Научный руководитель: **Кочеткова Ирина Андреевна**
кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры теории вероятностей и кибербезопасности Российского университета дружбы народов имени Патриса Лумумбы.

Официальные оппоненты: **Степанов Сергей Николаевич**
Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой сетей связи и систем коммутации Московского технического университета связи и информатики;

Моисеева Светлана Петровна
Доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой теории вероятностей и математической статистики Томского государственного университета;

Некрасова Руслана Сергеевна
Кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории стохастического моделирования информационно-вычислительных и телекоммуникационных систем института прикладных математических исследований Карельского научного центра Российской академии наук.

Защита диссертации состоится 14 марта 2025 г. 15:00 на заседании диссертационного совета ПДС 0200.006 при Российском университете дружбы народов имени Патриса Лумумбы по адресу: г. Москва, ул. Орджоникидзе, д. 3, ауд. 214.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке Российского университета дружбы народов имени Патриса Лумумбы по адресу: 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6.

Автореферат разослан «__» _____ 2025 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
ПДС 0200.006 к.ф.-м.н, доцент

Геворкян М.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

Беспроводные сети пятого поколения и последующих поколения (англ. Next Generation Networks, NGN) открывают новые возможности использования, которые требуют высоких скоростей передачи данных, возможности подключения большого количества устройств одновременно и передачи данных с минимальной задержкой и высокой надежностью.

Для реализации некоторых сценариев предполагается совместное использование сверхнадежной связи с малой задержкой (англ. Ultra-Reliable Low Latency Communications, URLLC) и улучшенной мобильной широкополосной связи (англ. Enhanced Mobile Broadband, eMBB). Сверхнадежная связь предъявляет строгие требования к пропускной способности, задержке и доступности, например, для удаленной медицинской хирургии и обеспечения транспортной и дорожной безопасности. Широкополосная связь ориентирована на людей и включает доступ к мультимедийному контенту, услугам и данным, которые требуют широкого покрытия, высокой плотности пользователей и высоких скоростей передачи данных.

В сценариях использования телемедицины, удаленного наблюдения за пациентами, виртуальной реальности и умного города требуется совместное предоставление различных услуг с разными требованиями к качеству обслуживания. В сценарии использования «умный город» сверхнадежная связь играет ключевую роль в обеспечении безопасности пешеходов и эффективной работе экстренных служб. Эта связь основана на узкополосном трафике и очень чувствительна к задержкам, независимо от объема передаваемых данных. В управлении дорожным движением разделение сети на отдельные сегменты может быть эффективным решением, особенно при работе с большими объемами данных. Однако в сценариях с небольшими пакетами использование сегментации сети для уведомлений службам безопасности может негативно сказаться на пропускной способности. При видеонаблюдении окружающей среды важными требованиями являются высокая скорость передачи данных и отсутствие задержек и сбоев посредством широкополосного трафика.

В связи с этим возникает вопрос о распределении частотно-временных ресурсов для данных сценариев. Один из подходов – это мультиплексирование частотного канала на временные интервалы. Эти интервалы затем распределяются между сессиями приоритетного узкополосного и широкополосного трафика. При этом, так как узкополосный трафик имеет строгие ограничения на задержку, он является приоритетным по отношению к широкополосному.

Диссертация посвящена разработке и анализу приоритетных систем доступа двух типов трафика: широкополосного eMBB и узкополосного URLLC, с зависимым занятием двух типов ресурса – мощности сигнала и длительности кадра и различными схемами доступа.

Степень разработанности темы. Анализом беспроводных сетей занимаются ученые Бегишев В.О., Вишневский В.М., Гайдамака Ю.В., Дудин А.Н., Кучерявый А.Е., Кучерявый Е.А., Молчанов Д.А., Мутханна А.А., Наумов В.А., Парамонов А.И., Самуйлов К.Е., Сопин Э.С., Степанов С.Н., Шоргин С.Я. В частности, вопросом передачи узкополосного трафика занимаются ученые Бегишев В.О., Гайдамака Ю.В., Молчанов Д.А., Парамонов А.И., Самуйлов К.Е., Chen N., Kumar R., Popovski P.

Для анализа функционирования беспроводных сетей используются методы теории массового обслуживания, теории случайных процессов, теории телетрафика. Основной вклад в развитие этих методов оказали ученые Башарин Г.П., Гайдамака Ю.В., Дудин А.Н., Моисеев А.Н., Моисеева С.П., Назаров А.А., Самуйлов К.Е., Степанов С.Н., Цитович И.И. Развитием систем массового обслуживания с орбитами занимаются ученые Ефросинин Д.В., Моисеева С.П., Морозов Е.В., Назаров А.А., Некрасова Р.С., Степанов С.Н.

Ресурсные системы массового обслуживания и методы стохастической геометрии позволяют учитывать использование ресурсов в моделях беспроводных сетей. Большой вклад в развитие этой темы внесли такие ученые, как Гайдамака Ю.В., Наумов В.А., Самуйлов К.Е., Моисеева С.П., Сопин Э.С., Тихоненко О.М., Volla R.

Цель диссертационной работы состоит в разработке моделей приоритетного доступа потокового трафика с зависимым занятием ресурса для анализа и расчета показателей эффективности передачи широкополосного трафика в условиях приоритетного узкополосного трафика с прерыванием обслуживания и снижением мощности сигнала в беспроводной сети.

Для достижения этой цели в диссертационной работе решаются следующие **задачи**:

- Разработка моделей приоритетного доступа узкополосного трафика со снижением мощности сигнала, скорости передачи и прерыванием обслуживания широкополосного трафика при зависимом занятии двух типов ресурса – мощности сигнала и длительности кадра.
- Разработка алгоритмов для анализа и расчета показателей эффективности обслуживания широкополосного трафика при приоритетном доступе узкополосного трафика в беспроводной сети, анализ влияния на показатели моделей мощности затухания сигнала.

Научная новизна диссертационной работы.

1. Модель с возобновлением обслуживания учитывает время на попытки начать и возобновить передачу широкополосного трафика в виде системы с двумя орбитами. Ранее в моделях для анализа сверхнадежной передачи и широкополосной связи использовались системы с очередями.
2. В модели с прерыванием обслуживания используется модель мощности затухания сигнала с кусочно-заданной функцией для прямой видимости и максимумом нескольких функций для не прямой видимости. Ранее в ресурсных системах массового обслуживания применялись по одной формуле для задания затухания сигнала в зонах прямой и не прямой видимости. Модель содержит два типа ресурса – длительность кадра и мощность сигнала. Ранее в ресурсных системах, применяемых для анализа беспроводных сетей, использовался один тип ресурса – отношение мощности сигнала к шуму и интерференции.
3. Модель со снижением скорости передачи использует дискриминаторное разделение длительности кадра между сессиями пропорционально требованиям к скорости обслуживания трафика и зависимым выбором уровня мощности сигнала. Ранее в ресурсных системах массового обслуживания применялось равное разделение кадра между сессиями.

Теоретическая и практическая значимость работы. Ресурсные системы массового обслуживания широко применяются для анализа беспроводных сетей, учитывая их особенности, такие как затухание сигнала при его распространении. Модель ресурса, представленная для таких систем, позволяет учесть зависимое занятие двух типов ресурса – мощности сигнала и длительности кадра. Разработанные модели с различными схемами доступа и приоритетной передачей узкополосного и широкополосного трафика могут быть полезны сотовым операторам при развертывании и работе беспроводных сетей пятого и последующих поколений. Они позволят наиболее эффективно использовать доступную пропускную способность и учитывать требования к обслуживанию широкополосного трафика.

Методы исследования. В диссертационной работе применяются методы теории массового обслуживания, математической теории телетрафика и стохастической геометрии.

Положения, выносимые на защиту.

1. Модель с возобновлением обслуживания и матричный алгоритм расчета стационарного распределения позволяют выбрать параметр потока попыток возобновления обслуживания и рассчитать показатели эффективности широкополосной связи при приоритетной сверхнадежной передаче данных – вероятность прерывания обслуживания, среднее число прерванных сессий.

2. Модель с прерыванием обслуживания и алгоритм снижения размерности системы уравнений равновесия применимы для анализа влияния на показатели эффективности моделей мощности затухания сигнала, расчета показателей эффективности передачи широкополосного трафика – вероятность прерывания обслуживания, среднее число сессий.
3. Модель со снижением скорости передачи позволяет рассчитать среднюю скорость широкополосного трафика с учетом снижения мощности сигнала, выбрать уровни скорости при ограничениях на вероятности прерывания обслуживания и блокировки.

Степень достоверности и апробация результатов обеспечивается численными экспериментами с применением численного анализа. Основные результаты работы представлены на всероссийских и международных конференциях: «Математическое и программное обеспечение информационных, технических и экономических систем» (г. Томск, ИПМКН ТГУ, 2020); «Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем» (г. Москва, РУДН, 2019-2024); «Distributed computer and communication networks: control, computation, communications» (г. Москва, РУДН, 2022), «Stochastic Modeling and Applied Research of Technology» (г. Петрозаводск, 2024), «Новые информационные технологии в исследовании сложных структур» (Алтай, ТГУ, 2024).

Основные результаты опубликованы в ведущих научных журналах: Mathematics (Scopus, Top-10), Lecture Notes in Computer Science, Информатика и ее применение, а также в трудах международных конференций, индексируемых в Web of Science и Scopus.

Реализация результатов работы. Результаты диссертационной работы включены в исследования по грантам РФФИ № 20-37-70079 «Исследование и разработка моделей и интеллектуальных алгоритмов совместного обслуживания трафика с малыми задержками и широкополосного доступа в беспроводных сетях пятого поколения» и научных проектов РУДН № 025319-2-000 «Разработка моделей и алгоритмов нарезки радиоресурсов и приоритетного доступа в беспроводной сети 6G» и № 021937-2-000 «Модели математической теории телетрафика для анализа приоритетного обслуживания потокового и эластичного трафика в сетях новых поколений».

Публикации. Основные результаты диссертации изложены в 11 работах в том числе в 1 издании, входящем в TOP-10, в 4 изданиях, входящих в базу данных Scopus, в 1 свидетельстве о государственной регистрации программ для ЭВМ.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, определены цели и задачи исследования, а также указаны научная новизна и практическая ценность данной работы.

В диссертационной работе исследуются модели, предназначенные для совместного обслуживания двух видов трафика. Первый вид – это узкополосный трафик, который требует сверхнадежной связи с минимальными задержками. Он обладает строгими требованиями к задержке и считается приоритетным. Вторым видом – это широкополосный трафик, включающий в себя расширенную мобильную связь. Модели представлены в виде приоритетных систем массового обслуживания с различными схемами доступа. Эти схемы определяют, как будет передаваться широкополосный трафик при ограниченных ресурсах и какое влияние на него окажет приоритетный трафик.

Рассматривается система пропускной способности C . В систему поступают запросы начать обслуживание широкополосного и узкополосного трафика согласно пуассоновскому потоку с интенсивностями λ_m, λ_u . Длительность сессий распределена согласно экспоненциальному закону со средними значениями μ_m^{-1}, μ_u^{-1} соответственно. Сессии широкополосного трафика передают данные со скоростью b , тогда максимальное число обслуживаемых сессий широкополосного трафика равно $N = \lfloor C/b \rfloor$. Такую систему можно описать случайным процессом $\mathbf{X}(t), t \geq 0$ с состояниями, описывающими число обслуживаемых сессий широкополосного и узкополосного трафика.

В **первой** главе описана модель приоритетной передачи с возможностью возобновления обслуживания широкополосного трафика, которая предполагает задержку в передаче широкополосного трафика и прерывание его сессий. Эта схема также позволяет отправлять повторные запросы начать обслуживание и осуществлять повторные попытки возобновить передачу через определенное время, распределенное по экспоненциальному закону с интенсивностями γ_1 и γ_2 . Модель представлена в виде системы массового обслуживания с двумя орбитами размерностями C_1 и C_2 соответственно. Первая орбита предназначена для задержанных запросов q_1 , вторая – для попыток возобновить передачу прерванных сессий q_2 . При этом вторая орбита имеет приоритет по отношению к первой.

Такая модель описывается четырехмерным марковским случайным процессом $\mathbf{X}(t), t \geq 0$ над пространством состояний следующего вида:

$$\mathcal{X} = \left\{ (n_m, n_u, q_1, q_2) : \begin{array}{l} n_m \geq 0, \quad n_u \geq 0, \quad 0 \leq q_1 \leq C_1, \quad 0 \leq q_2 \leq C_2, \\ bn_m + n_u \leq C, \quad n_m + q_2 \leq N \end{array} \right\} \quad (1)$$

В разделе 1.5 представлена матрица интенсивностей переходов, записанная в блочном трехдиагональном виде для заданного количества повторных запросов широкополосного трафика, согласно утверждению 1. Количество запросов отражено в блоках, расположенных на главной диагонали.

Утверждение 1. Если на множестве \mathcal{X} (1) введен лексикографический порядок $\mathbf{x}' = (n'_m, n'_u, q'_1, q'_2) \succ (n_m, n_u, q_1, q_2) = \mathbf{x} \Leftrightarrow (q'_1 > q_1)$ или $(q'_1 = q_1, q'_2 > q_2)$ или $(q'_1 = q_1, q'_2 = q_2, n'_m > n_m)$ или $(q'_1 = q_1, q'_2 = q_2, n'_m = n_m, n'_u > n_u)$, (2)

тогда матрица интенсивностей переходов СП $\mathbf{X}(t)$ представима в блочном трехдиагональном виде

$$\Lambda = \begin{pmatrix} \Lambda_{00} & \Lambda_{11} & \mathbf{0} & \cdot & \mathbf{0} \\ \Lambda_{21} & \Lambda_{01} & \Lambda_{12} & \cdot & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \Lambda_{22} & \cdot & \cdot & \mathbf{0} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \Lambda_{1C_1} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \Lambda_{2C_1} & \Lambda_{0C_1} \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где блоки матрицы Λ имеют размерности:

$$\dim \Lambda_{ik} : A^2, \quad i = 0, k = \overline{0, C_1}, \quad (4)$$

$$i = 1, 2, k = \overline{1, C_1},$$

$$\text{где } A = \sum_{q_2=0}^{C_2} \sum_{n_m=0}^{N-q_2} (C - bn_m + 1),$$

а ненулевые положительные элементы матриц $\Lambda_{0k}, \Lambda_{1k}, \Lambda_{2k}$ имеют вид

$$\Lambda_{0k}(\mathbf{x}, \mathbf{x}') = \begin{cases} \lambda_u, & n'_m = n_m, \quad n'_u = n_u + 1, \quad q'_1 = q_1, \quad q'_2 = q_2 \quad \text{или} \\ & n'_m = n_m - 1, \quad n'_u = n_u + 1, \quad q'_1 = q_1, \quad q'_2 = q_2 + 1, \\ n_u \mu_u, & n'_m = n_m, \quad n'_u = n_u - 1, \quad q'_1 = q_1, \quad q'_2 = q_2, \\ \lambda_m, & n'_m = n_m + 1, \quad n'_u = n_u, \quad q'_1 = q_1 = 0, \quad q'_2 = q_2 = 0, \\ n_m \mu_m, & n'_m = n_m - 1, \quad n'_u = n_u, \quad q'_1 = q_1, \quad q'_2 = q_2, \\ \gamma_2, & n'_m = n_m + 1, \quad n'_u = n_u, \quad q'_1 = q_1, \quad q'_2 = q_2 - 1. \end{cases} \quad (5)$$

$$\Lambda_{1k}(\mathbf{x}, \mathbf{x}') = \lambda_m, \quad n'_m = n_m, \quad n'_u = n_u, \quad q'_1 = q_1 + 1, \quad q'_2 = q_2, \quad (q_1 \neq 0 \quad \text{или} \quad q_2 \neq 0). \quad (6)$$

$$\Lambda_{2k}(\mathbf{x}, \mathbf{x}') = \gamma_1, \quad n'_m = n_m + 1, \quad n'_u = n_u, \quad q'_1 = q_1 - 1, \quad q'_2 = q_2, \quad bn_m + n_u < C - b, \quad q_2 = 0, \quad q_1 \neq 0.$$

Далее в разделе 1.5 представлен рекуррентный алгоритм расчета стационарного распределения с учетом блочного вида матрицы интенсивностей переходов. Этот алгоритм описан в лемме 1.

Лемма 1. Стационарные вероятности состояний модели с двумя орбитами вычисляются в матричном виде по формуле

$$\pi_k = \pi_{C_1} \prod_{j=1}^{N-k} \mathbf{M}_{C_1-j}, \quad k = \overline{0, C_1-1}, \quad (7)$$

где вектор π_{C_1} является единственным решением системы уравнений

$$\begin{cases} \pi_{C_1} \sum_{k=0}^{C_1} \prod_{j=1}^{C_1-k} \mathbf{M}_{C_1-j} \mathbf{e}^T = 1, \\ \pi_{C_1} (\mathbf{M}_{C_1-1} \Lambda_{1C_1} + \Lambda_{0C_1}) = \mathbf{0}, \end{cases} \quad (8)$$

а матрицы \mathbf{M}_{C_1-j} вычисляются согласно рекуррентным соотношениям

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_0 &= -\Lambda_{21} \Lambda_{00}^{-1}, \\ \mathbf{M}_k &= -\Lambda_{2,k+1} (\mathbf{M}_{k-1} \Lambda_{1k} + \Lambda_{0k})^{-1}, \quad k = \overline{1, C_1-1}. \end{aligned} \quad (9)$$

В рамках численного анализа разработанной модели были рассмотрены различные стратегии обслуживания, варьируя размер орбит в системе относительно широкополосного трафика: (i) без возобновления обслуживания ($C_1 = C_2 = 0$), (ii) с возобновлением обслуживания прерванных сессий ($C_1 = 0$), (iii) с возобновлением обслуживания ($C_1 = C_2$). При этом предполагалось, что запросы начать обслуживание узкополосного трафика поступают в систему в K раз чаще. Для сравнения схем были проанализированы следующие показатели:

– среднее число обслуживающихся сессий широкополосного трафика

$$\bar{n}_m = \sum_{n_m=1}^N n_m \sum_{n_u=0}^{C-bn_m} \sum_{q_1=0}^{C_1} \sum_{q_2=0}^{C_2-n_m} \pi(n_m, n_u, q_1, q_2), \quad (10)$$

– вероятность прерывания сессий широкополосного трафика

$$\begin{aligned} P^{\text{in}} &= \sum_{n_m=1}^N \sum_{q_2=0}^{C_2-n_m} \sum_{q_1=0}^{C_1-1} \left(\frac{\lambda_u}{\lambda_u + \lambda_m + n_m \mu_m + (C - bn_m) \mu_u} \frac{1}{n_m} \pi(n_m, C - bn_m, q_1, q_2) \right) + \\ &+ \sum_{n_m=1}^N \sum_{q_2=0}^{C_2-n_m} \left(\frac{\lambda_u}{\lambda_u + n_m \mu_m + (C - bn_m) \mu_u} \frac{1}{n_m} \pi(n_m, C - bn_m, C_1, q_2) \right). \end{aligned} \quad (11)$$

Результаты численного анализа показаны на Рис. 1. График вероятности прерывания можно разделить на три области с разным поведением: при $k = \overline{0, 10\,000}$ число сессий уменьшается, что приводит к увеличению вероятности прерывания; при $k = \overline{10\,000, 30\,000}$ число сессий и вероятность прерывания медленно уменьшаются; при $k > 30\,000$ вероятность прерывания возрастает, а число сессий уменьшается, что может привести к прерыванию всех сессий широкополосного трафика. Несмотря на то, что вероятность прерываний самая высокая при третьей схеме (Рис. 1б), она позволяет обслуживать большее число

сессий широкополосного трафика (Рис. 1а), сохраняя при этом низкую вероятность прерываний.

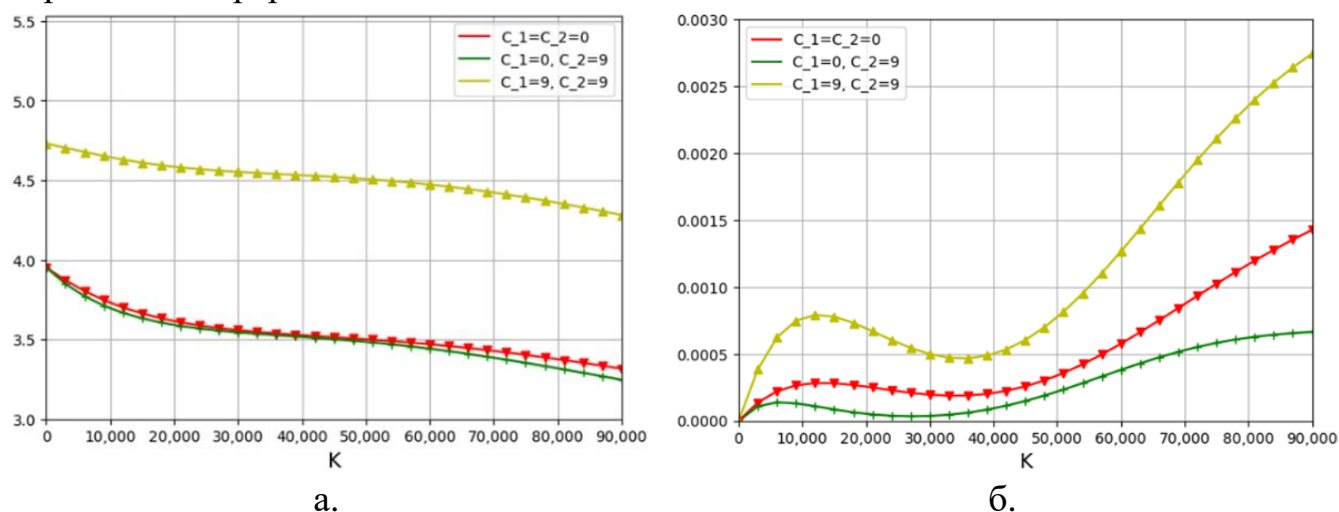


Рис. 1 а. среднее число сессий, б. вероятность прерывания широкополосного трафика для схем доступа: 1. без возобновления обслуживания; 2. с возобновлением обслуживания прерванных сессий; 3. с возобновлением обслуживания.

Во второй и третьей главах описывается моделирование приоритетного обслуживания с учетом использования ресурсов в зависимости от числа обслуживаемых сессий в системе. В представленных моделях рассматривается сота радиусом R с базовой станцией, расположенной на высоте h_{BS} от поверхности земли. Общая полоса частот, доступная для использования, составляет F . Длина кадра $T = 1$. Максимальная мощность передаваемого сигнала равна P . В соте случайным образом расположены пользовательские устройства на расстоянии d от базовой станции в двумерном измерении и D в трехмерном. Устройства находятся на высоте h_{UT} . Передающая и приемная антенны имеют коэффициенты усиления G_t и G_r соответственно. На сигнал могут влиять шумы и интерференция, мощность которых составляет N_0 и I_0 соответственно. При распространении сигнала происходит его затухание, мощность которого зависит от расстояния D и описывается моделью затухания сигнала PL.

Данные модели приоритетного обслуживания представлены в виде ресурсных систем массового обслуживания, где требование к ресурсу: $\mathbf{y} = (y_f, y_t, y_p)$, $y_f \in [0, F]$, $y_t \in [0, 1]$, $y_p \in [0, P]$. Под моделью требования к ресурсу будем понимать систему уравнений, которая задает тройку параметров $(y_f, y_t, y_p) \in \mathcal{Y}$, где \mathcal{Y} множество всех вариантов занятия ресурса:

$$b = y_t y_f \log_2 \left(1 + y_p \frac{P_t G_t G_r}{PL(N_0 + I_0)} \right), \quad (12)$$

$$A_j(y_f, y_t, y_p) = 0, \quad j = \overline{1, J}. \quad (13)$$

где $A_j(y_f, y_t, y_p)$ некоторая функция от (y_f, y_t, y_p) , а b требуемая скорость передачи.

Во **второй главе** в разделе 2.1 представлена формула для расчета функции распределения мощности затухания сигнала в условиях прямой (LOS) и не прямой (NLOS) видимостях, которая зависит от расстояния пользователя до базовой станции. Расстояние является случайной величиной ξ_d с функцией распределения $F_{\xi_d}(x) = \Pr(\xi_d \leq x)$, тогда мощность затухания сигнала ξ_{PL} будет являться функцией от случайной величины, а ее функция распределения в условиях LOS или NLOS видимостях будет иметь вид согласно утверждению 2. Для общего случая эта функция будет описываться леммой 2.

Утверждение 2. Функция распределения мощности затухания сигнала в условиях прямой или не прямой видимостях вычисляются согласно формулам

$$F_{\xi_{LOS}}(x) = \sum_{j=1}^J F_{\xi_j^{LOS}}(x) [F_{\xi_d}(d_j) - F_{\xi_d}(d_{j-1})], \quad (14)$$

$$F_{\xi_{NLOS}}(x) = F_{\xi_{LOS}}(x) \prod_{k=1}^K F_{\xi_k^{NLOS}}(x), \quad (15)$$

где компонента ξ_m^l имеет вид:

$$F_{\xi_m^l}(x) = \Pr(\xi_m^l \leq x) = F_{\xi_d} \left(\sqrt{\left(\frac{x}{\alpha_m^l} \right)^{2/\beta_m^l} - (h_{BS} - h_{UT})^2} \right), \quad (16)$$

$$l = \text{"LOS"}, m = j = \overline{1, J}, \quad l = \text{"NLOS"}, m = k = \overline{1, K},$$

где α_m^l и β_m^l коэффициенты модели затухания сигнала.

Лемма 2. Функция распределения мощности затухания сигнала приближенно вычисляется как свертка

$$F_{\xi_{PL}}(x) \approx \Pr(\xi_{LOS} E[\xi_{Pr_{LOS}}] + \xi_{NLOS} [1 - E[\xi_{Pr_{LOS}}]] \leq x) \approx \int_0^\infty F_{\xi_{LOS}} \left(\frac{x}{E[\xi_{Pr_{LOS}}]} - y \right) dF_{\xi_{NLOS}} \left(\frac{y}{1 - E[\xi_{Pr_{LOS}}]} \right), \quad (17)$$

$$\text{где } E[\xi_{Pr_{LOS}}] = \int_0^R Pr_{LOS}(x) dF_{\xi_d}(x).$$

При построении моделей ресурсных систем исследователи часто применяют упрощенные формулы. В разделе 2.2 представлено сравнение графиков функции распределения сигнала. Расчеты проводились как с использованием предложенных формул, так и с использованием упрощенных формул из спецификации 3GPP. Результаты сравнения графиков показаны на Рис. 2. График функции распределения, построенный на основе упрощенных формул,

располагается выше, что служит верхней оценкой, а следовательно, использование упрощенных формул может привести к занижению пропускной способности и количества пользователей, которые могут быть обслужены в сети.

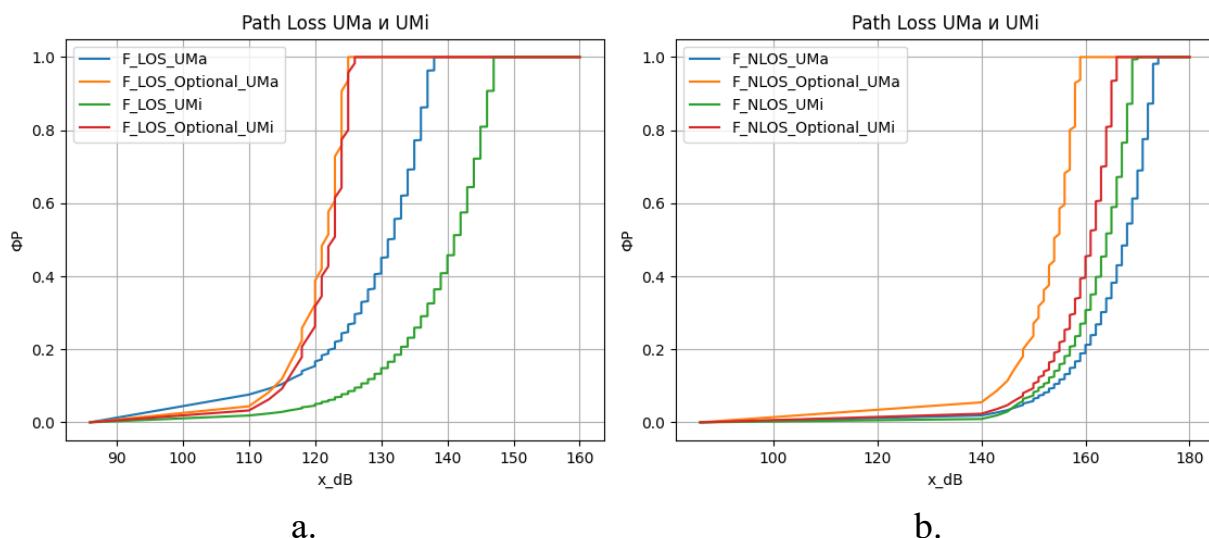


Рис. 2 График функции распределения мощности затухания сигнала в условиях видимости: а. прямой, б. непрямой

Далее разделе 2.3 описана схема доступа, которая позволяет прерывать передачу широкополосного трафика в случае нехватки ресурсов и поступления узкополосного трафика. Данная модель с прерыванием обслуживания широкополосного трафика представлена двумерным марковским случайным процессом $\mathbf{X}(t), t \geq 0$, где состояние (n_m, n_u) описывает число обслуживаемых сессий широкополосного и узкополосного трафика. Пространство состояний такой системы имеет вид

$$\mathcal{X} = \{(n_m, n_u) : n_m \geq 0, n_u \geq 0, bn_m + n_u \leq C\}. \quad (18)$$

В данной модели ресурс разделяется между сессиями согласно циклическому алгоритму, где временной интервал делится между всеми сессиями поровну, частота постоянна, а мощность изменяется для сессий широкополосного трафика и постоянна для сессий узкополосного трафика. Тогда требования к ресурсу для сессий узкополосного и широкополосного трафика и множество всех вариантов занятия ресурса для $(n_u, n_m) \in \mathcal{X} \setminus (\mathbf{0})$ имеют следующий вид соответственно:

$$\mathbf{y}^u(n_m, n_u) = \left(y_f^u = F, y_t^u = \frac{1}{n_u + n_m}, y_p^u = P \right), \quad (19)$$

$$\mathbf{y}^m(n_m, n_u) = \left(y_f^m = F, y_t^m = \frac{1}{n_u + n_m}, y_p^m = \frac{PL(N_0 + I_0)}{G_t G_r} \left[2^{\frac{b(n_u + n_m)}{F}} - 1 \right] \right), \quad (20)$$

$$y(n_m, n_u) = \left\{ \begin{array}{l} (y_1^m, \dots, y_{n_m}^u, y_1^u, \dots, y_{n_u}^u): y_f^u(i) = F, y_t^u(i) = \frac{1}{n_u + n_m}, y_p^u(i) = P, i = \overline{1, n_u}, \\ y_f^m(k, j) = F, y_t^m(k, j) = \frac{1}{n_u + n_m}, y_p^m(k, j) = \frac{PL_j^m(N_0 + I_0)}{G_t G_r} \left[2 \frac{b(n_u + n_m)}{F} - 1 \right], \\ y_p^m(k, j) \leq P, j = \overline{1, m_k}, k = \overline{1, K}, PL_j^m > 0 \end{array} \right\}. \quad (21)$$

Утверждение 3. Если требования к ресурсу для сессий узкополосного и широкополосного трафика имеют вид (19), (20), соответственно и множество всех вариантов занятия ресурса (21), тогда вероятность того, что уже обслуживается $(n_m, n_u) \in \mathcal{X}$ сессий, равна

$$A(n_m, n_u) = \left[F_{\xi_{PL}} \left(P \frac{G_t G_r}{N_0 + I_0} \frac{1}{2 \frac{b(n_u + n_m)}{F} - 1} \right) \right]^{n_m}, \quad (22)$$

где $F_{\xi_{PL}}(\cdot)$ задается леммой 2.

Лемма 3. Если требования к ресурсу и множество всех вариантов занятия ресурса имеют вид согласно утверждению 2, тогда вероятности принятия новых узкополосных и широкополосных сессий, при условии того, что уже обслуживается $(n_m, n_u) \in \mathcal{X}$ сессий, вычисляются соответственно по следующим формулам

$$p_u(n_m, n_u) = \left[F_{\xi_{PL}} \left(\frac{B}{2 \frac{b(n_u + 1 + n_m)}{F} - 1} \right) \right]^{n_m} \left[\left[F_{\xi_{PL}} \left(\frac{B}{2 \frac{b(n_u + n_m)}{F} - 1} \right) \right]^{n_m} \right]^{-1}; \quad (23)$$

$$p_m(n_m, n_u) = \left[F_{\xi_{PL}} \left(\frac{B}{2 \frac{b(n_u + n_m + 1)}{F} - 1} \right) \right]^{n_m + 1} \left[\left[F_{\xi_{PL}} \left(\frac{B}{2 \frac{b(n_u + n_m)}{F} - 1} \right) \right]^{n_m} \right]^{-1}, \quad (24)$$

$$\text{где } B = \frac{P G_t G_r}{N_0 + I_0}.$$

В разделе 2.4 представлены матрица интенсивностей переходов в блочном трехдиагональном виде и количество сессий широкополосного трафика, отраженное в блоках главной диагонали. Лемма 4 описывает способ расчета стационарного распределения с учетом блочного вида матрицы.

Для снижения размерности системы уравнений равновесия в разделе 2.5 приведены формулы расчета ненормированных вероятностей $q(n_m, n_u)$ в виде леммы 5.

Лемма 5. Ненормированные вероятности $q(n_m, n_u)$ вычисляются согласно следующим формулам

$$q(N, 0) = X_N = 1, \quad q(i, 0) = X_{n_m}, \quad i = \overline{0, N-1}, \quad q(n_m, n_u) = \sum_{i=0}^N a_i(n_m, n_u) X_i, \quad (25)$$

где коэффициенты $a_i(n_m, n_u)$, $i = \overline{0, N}$ вычисляются рекуррентно по формулам

$$a_i(i, 0) = 1, \quad a_i(n_m, 0) = 0, \quad n_m = \overline{0, N}, \quad n_m \neq i; \quad (26)$$

$$\begin{aligned} a_i(n_m, n_u) = & \frac{1}{n_u \mu_u} \left[a_i(n_m, n_u - 1) \left[\lambda_m p_m(n_m, n_u - 1) I(bn_m + n_u - 1 + b \leq C) + \right. \right. \\ & + n_m \mu_m + (n_u - 1) \mu_u + \lambda_u p_u(n_m, n_u - 1) I(bn_m + n_u \leq C) + \\ & \left. \left. + \lambda_u p_u(n_m, n_u - 1) I(bn_m + n_u > C, n_m > 0) \right] - \right. \\ & - a_i(n_m - 1, n_u - 1) \lambda_m p_m(n_m - 1, n_u - 1) I(n_m > 0) - \\ & - a_i(n_m, n_u - 2) \lambda_u p_u(n_m, n_u - 2) I(n_u > 1) - \\ & - a_i(n_m + 1, n_u - 2) \lambda_u p_u(n_m + 1, n_u - 2) I(b(n_m + 1) + n_u - 2 = C, n_u > 1) - \\ & \left. - a_i(n_m + 1, n_u - 1) (n_m + 1) \mu_m I(b(n_m + 1) + n_u - 1 \leq C) \right], \end{aligned} \quad (27)$$

$$(n_m, n_u) \in \left\{ (n_m, n_u) \in \mathcal{X} : 0 < n_u \leq C - bn_m \right\},$$

тогда X_i , $i = \overline{0, N}$ является решением системы уравнений, где $n_m = \overline{1, N-1}$:

$$\begin{cases} \sum_{i=0}^{N-1} \beta_i(n_m) X_i + \beta_N(n_m) = 0, \\ \beta_i(n_m) = a_i(n_m, C - bn_m) \left[\lambda_u p_u(n_m, C - bn_m) + n_m \mu_m + (C - bn_m) \mu_u \right] - \\ \quad - a_i(n_m - 1, C - bn_m) \lambda_m p_m(n_m - 1, C - bn_m) \\ \quad - a_i(n_m, C - bn_m - 1) \lambda_u p_u(n_m, C - bn_m - 1). \end{cases} \quad (28)$$

В третьей главе рассматривается схема доступа, при которой скорость передачи широкополосного трафика снижается до K -ого уровня, после чего сессия широкополосного трафика прерывается. Скорости передачи широкополосного трафика уровня $k = \overline{1, K}$ обозначаются вектором $\mathbf{b} = (b_1, \dots, b_K)$, $b_1 > \dots > b_K$. Число сессий широкополосного трафика, передающих данные с k -ой скоростью, обозначается вектором $\mathbf{m} = (m_1, \dots, m_K)$. Такая модель со снижением скорости передачи широкополосного трафика описывается двухмерным случайным процессом $\mathbf{X}(t)$, $t \geq 0$ с пространством состояний следующего вида

$$\mathcal{X} = \left\{ (\mathbf{m}, n_u) : 0 \leq n_u \leq C, m_k \geq 0, k = \overline{1, K}, \sum_{k=1}^K m_k \leq N, n_u + \sum_{k=1}^K b_k m_k \leq C \right\}. \quad (29)$$

В этой модели распределение ресурсов между сессиями происходит по взвешенному циклическому алгоритму (Weighted Round Robbin, WRR), где временной интервал дискриминаторно делится в соответствии с требуемыми скоростями передачи. Частота постоянна, а мощность меняется для сессий широкополосного трафика и постоянна для узкополосного трафика. Тогда

требования к ресурсу для сессий $c(\mathbf{x}) = n_u + \sum_{k=1}^K b_k m_k$ и множество всех вариантов занятия ресурса для $\mathbf{x} \in \mathcal{X} \setminus \{\mathbf{0}\}$ имеют следующий вид соответственно:

$$\mathbf{y}^u(\mathbf{x}) = \left(y_f^u = F, y_t^u = \frac{1}{c(\mathbf{x})}, y_p^u = P \right), \quad (30)$$

$$\mathbf{y}^m(\mathbf{x}) = \left(y_f^m = F, y_t^m = \frac{b_k}{c(\mathbf{x})}, y_p^m = \frac{\text{PL}(N_0 + I_0)}{G_t G_r} \left[2^{\frac{c(\mathbf{x})}{F b_k}} - 1 \right] \right), \quad (31)$$

$$\mathcal{Y}(\mathbf{x}) = \left\{ \begin{array}{l} \left(\mathbf{y}_{11}^m, \dots, \mathbf{y}_{1m_1}^m, \dots, \mathbf{y}_{K1}^m, \dots, \mathbf{y}_{Km_K}^m, \mathbf{y}_{n_u}^u, \dots, \mathbf{y}_{n_u}^u \right) : y_f^u(i) = F, y_t^u(i) = \frac{1}{c(\mathbf{x})}, \\ y_p^u(i) = P, \quad i = \overline{1, n_u}; y_f^m(k, j) = F, y_t^m(k, j) = \frac{b_k}{c(\mathbf{x})}, \\ y_p^m(k, j) = \frac{\text{PL}_j^m(N_0 + I_0)}{G_t G_r} \left[2^{\frac{c(\mathbf{x})}{F b_k}} - 1 \right] \leq P, j = \overline{1, m_k}, k = \overline{1, K}, \text{PL}_j^m \geq 1 \end{array} \right\}. \quad (32)$$

Утверждение 5. Если требования к ресурсу для сессий узкополосного и широкополосного трафика имеют вид (30) и (31) соответственно и множество всех вариантов занятия ресурса (32), тогда вероятность того, что сессии узкополосного и широкополосного трафика обслуживаются суммарно со скоростью $c(\mathbf{x})$, равна

$$A(\mathbf{x}) = \left[F_{\xi_{\text{PL}}} \left(\frac{P G_t G_r}{N_0 + I_0} \left(2^{\frac{c(\mathbf{x})}{F b_k}} - 1 \right)^{-1} \right) \right]_{k=1}^{\sum_{k=1}^K m_k}, \quad \mathbf{x} \in \mathcal{X}. \quad (33)$$

где $F_{\xi_{\text{PL}}}(\cdot)$ задается леммой 7.

Лемма 6. Если модель ресурса имеет вид согласно утверждению 5, тогда вероятности принятия новых сессий узкополосного и широкополосного трафика, соответственно, при условии того, что что сессии узкополосного и широкополосного трафика обслуживаются суммарно со скоростью $c(\mathbf{x})$ вычисляются по следующим формулам

$$p_u(\mathbf{x}) = \left[F_{\xi_{\text{PL}}} \left(\frac{B}{2^{\frac{c(\mathbf{x} + \mathbf{e}_{K+1})}{F b_k}} - 1} \right) \right]_{k=1}^{\sum_{k=1}^K m_k} \left[\left(F_{\xi_{\text{PL}}} \left(\frac{B}{2^{\frac{c(\mathbf{x})}{F b_k}} - 1} \right) \right)_{k=1}^{\sum_{k=1}^K m_k} \right]^{-1}, \quad (34)$$

$$p_m(\mathbf{x}) = \left[F_{\xi_{\text{PL}}} \left(\frac{B}{2^{\frac{c(\mathbf{x} + \mathbf{e}_1)}{F b_k}} - 1} \right) \right]_{k=1}^{\sum_{k=1}^K m_k + 1} \left[\left(F_{\xi_{\text{PL}}} \left(\frac{B}{2^{\frac{c(\mathbf{x})}{F b_k}} - 1} \right) \right)_{k=1}^{\sum_{k=1}^K m_k} \right]^{-1}, \quad (35)$$

где $B = \frac{PG_t G_r}{N_0 + I_0}$, e_k единичный вектор с 1 на k -ом месте.

В рамках численного анализа была решена задача выбора начального набора уровней скорости передачи широкополосного трафика (K, b) , при которой достигается максимальная средняя скорость передачи широкополосного трафика

$$\bar{b} = \left[\sum_{(m, n_u) \in \mathcal{X}} \sum_{k=1}^K b_k m_k \left(\sum_{k=1}^K m_k \right)^{-1} \pi(m, n_u) \right] \left[1 - \sum_{n_u=0}^C \pi(0, \dots, 0, n_u) \right]^{-1}. \quad (36)$$

в виде задачи максимизации с учетом ограничений на вероятность блокировки и прерывания широкополосного трафика, вычисляемую согласно формуле

$$P^{\text{in}} = \pi(0, \dots, 0, m_K, C - b_K m_K) \cdot \sum_{m_K=1}^N \frac{1}{m_K} \frac{\lambda_u p_u(0, \dots, 0, m_K, C - b_K m_K)}{\lambda_u p_u(0, \dots, 0, m_K, C - b_K m_K) + (C - b_K m_K) \mu_u + m_K \mu_m}. \quad (37)$$

Численно решив задачу максимизации при условии, что запросы узкополосного трафика поступают в n раз чаще, чем широкополосного, получены графики, изображенные на Рис. 3. Поведение графика вероятности прерывания можно объяснить так же, как в случае модели приоритетного обслуживания с двумя орбитами: до $n = 60000$ при увеличении числа широкополосных сессий вероятность прерывания уменьшается. При $n > 60000$ вероятность уменьшается, так как число сессий широкополосного трафика становится меньше. Максимальная средняя скорость передачи широкополосного трафика достигается при наборе скоростей $(1; 6)$, однако для этого набора вероятность прерывания будет максимальной. Поэтому решение этой задачи будет зависеть от наложенных ограничений.

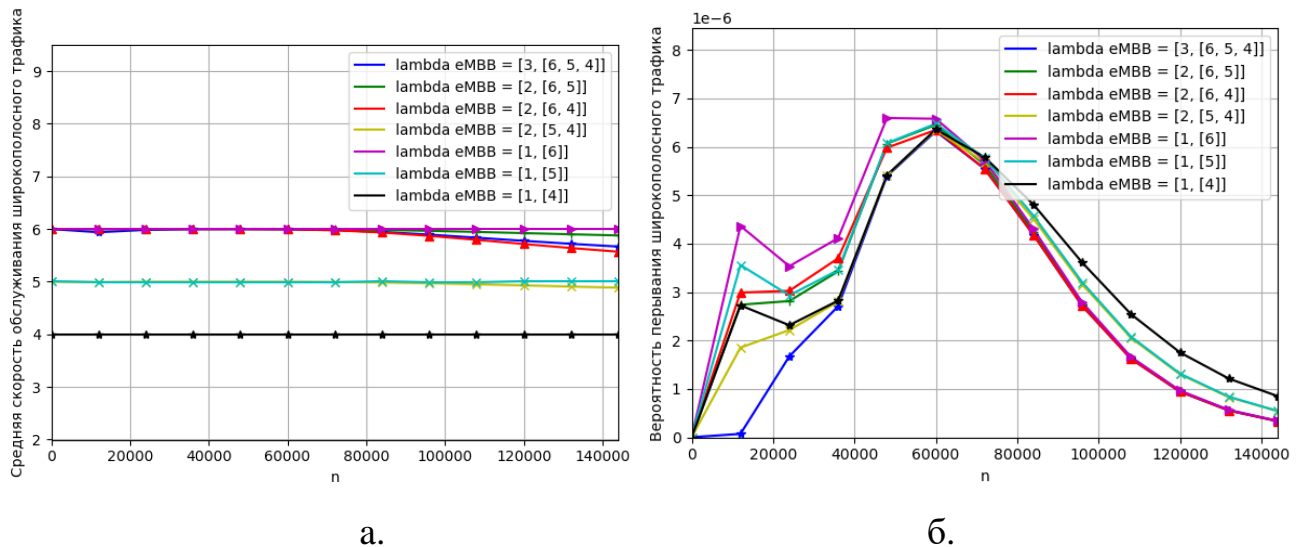


Рис. 3 Модель со снижением скорости: а. вероятность прерывания, б. вероятность блокировки сессий широкополосного трафика

В **заключении** представлены основные результаты диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В **заключении** диссертационной работы сформулируем основные результаты и выводы полученных результатов по сравнению с результатами других исследований.

1. Разработана модель приоритетного доступа узкополосного трафика с возобновлением и ожиданием начала обслуживания широкополосного трафика в виде системы массового обслуживания с двумя орбитами. Матрица интенсивностей переходов записана в блочном трехдиагональном виде и разработан матричный алгоритм расчета стационарного распределения. Сформулирована и численно решена задача выбора параметра потока попыток возобновления обслуживания широкополосного трафика.
2. Построена ресурсная система массового обслуживания с приоритетным доступом узкополосного трафика и прерыванием обслуживания широкополосного трафика. Ресурс состоит из двух компонент – первый тип ресурса моделирует длительность кадра, а второй тип ресурса описывает мощность сигнала. Длительность кадра разделяется поровну между всем сессиями, а мощность сигнала выбирается исходя из требования к скорости. Разработаны матричный алгоритм расчета стационарного распределения и алгоритм снижения размерности системы уравнений равновесия. В модели мощности затухания сигнала использован кусочно-заданный вид функции для прямой видимости и максимум нескольких функций для не прямой видимости.
3. Разработана модель приоритетного доступа узкополосного трафика со снижением скорости передачи и прерыванием обслуживания широкополосного трафика. Модель построена в виде системы массового обслуживания с зависимым занятием двух типов ресурса. Длительность кадра разделяется дискриминаторно пропорционально требованиям к скорости обслуживания трафика. Формализована задача максимизации средней скорости широкополосного трафика по значениям уровней скорости и при ограничениях на вероятности прерывания обслуживания и блокировки.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Работы в изданиях, входящих в базы данных Scopus/Web of Science

1. *Макеева Е.Д., Кочеткова И.А., Шоргин С.Я.* Вероятностная модель затухания мощности сигнала в сценариях 3GPP TR 38.901 развертывания сети 5G // Информатика и ее применения. – 2024. – Т. 18, № 2. – С.25-31.
2. *Makeeva E., Kochetkova I., Alkanhel R.* Retrial Queueing System for Analyzing Impact of Priority Ultra-Reliable Low-Latency Communication Transmission on Enhanced Mobile Broadband Quality of Service Degradation in 5G Networks // Mathematics. – 2023. 11(18).
3. *Kochetkova I., Makeeva E., Ageeva A., Gorshenin A.* Model for Analyzing Impact of Path Loss on eMBB Bit Rate Degradation Under Priority URLLC Transmission in 5G Network // Lecture Notes in Computer Science, LNCS. – 2022. P. 176-189.
4. *Харин П.А., Макеева Е.Д., Кочеткова И.А., Ефросинин Д.В., Шоргин С.Я.* Система массового обслуживания с орбитами для анализа совместного трафика с малыми задержками URLLC и широкополосного доступа eMBB в беспроводных сетях пятого поколения // Информатика и ее применения. – 2020; 14(4): P. 17-24.

Работы в изданиях, входящих в Перечень ВАК

5. *Макеева Е.Д., Кочеткова И.А., Шоргин В.С.* Модель для выбора уровней скорости широкополосного трафика eMBB в условиях приоритетной передачи трафика URLLC в сети 5G // Системы и средства информатики. – 2023. – Т. 33. – № 4. – С. 60-68.

Патенты

6. *Агеева А.С., Макеева Е.Д., Кочеткова И.А.* Расчет характеристик модели приоритетного доступа трафика URLLC с адаптивным изменением скорости трафика eMBB в условиях затухания сигнала сети 5G // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU2023663827/ 28.06.2023. Заявка № 2023662790, 21.06.2023.

Конференции

7. *Макеева Е.Д.* Сравнительный анализ моделей обслуживания широкополосного трафика при приоритетной передаче данных с малой задержкой в беспроводной сети // В сборнике: Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем. Материалы Всероссийской конференции с международным участием. Москва, 2024. С.138-141.
8. *Макеева Е.Д., Аскеров А.Э., Кочеткова И.А.* Анализ вероятностной модели затухания мощности сигнала в сценариях 3GPP TR 38.901 сети 5G // В сборнике: Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем. Материалы Всероссийской конференции с международным участием. Москва, 2024. С. 142–146.
9. *Makeeva E.* Approaches to the joint scheduling of URLLC and EMBB traffic transmission in wireless 5G networks // Цифровое общество: образование, наука, карьера. Москва, 2021. – С. 410-420.
10. *Леонтьева К.А., Макеева Е.Д.* Анализ показателей эффективности передачи широкополосного трафика при приоритетных сессиях с низкой задержкой в беспроводной сети // Информационные технологии и математическое моделирование: Материалы XXII Международной конференции имени А.Ф. Терпугова, Томск, 04–09 декабря 2023 года. – Томск: ТГУ, 2023. – С.173-177.
11. *Макеева Е.Д., Куцазли А.И., Кочеткова И.А.* Модель стохастической геометрии для анализа затухания сигнала в сценариях 3GPP TR 38.901 развертывания беспроводной сети // Новые информационные технологии в исследовании сложных структур: Материалы 15-ой международной конференции, Алтай, 16-20 сентября 2024. – Томск: ТГУ, 2024. – С.74-75.

Макеева Елена Дмитриевна (Россия)

АНАЛИЗ ПРИОРИТЕТНОЙ СИСТЕМЫ ОБСЛУЖИВАНИЯ ТРАФИКА С ЗАВИСИМЫМ ЗАНЯТИЕМ РАДИОРЕСУРСОВ

В диссертации разработаны модели приоритетного доступа узкополосного трафика со снижением мощности сигнала, скорости передачи и прерыванием обслуживания широкополосного трафика в беспроводной сети. Предложен матричный алгоритм расчета стационарного распределения модели с двумя орбитами, возобновлением и ожиданием начала обслуживания широкополосного трафика. Разработана модель с прерыванием обслуживания широкополосного трафика в виде ресурсной системы с зависимым занятием двух типов ресурса – длительности кадра и мощности сигнала. Модель мощности затухания сигнала при этом содержит кусочно-заданный вид функции для прямой видимости и максимум нескольких функций для непрямой видимости. Формализована и численно проанализирована задача максимизации средней скорости широкополосного трафика по значениям уровней скорости и при ограничениях на вероятности прерывания обслуживания и блокировки для ресурсной системы со снижением скорости передачи.

Makeeva Elena (Russia)

The thesis develops models for priority access to narrowband traffic with signal power degradation, transmission rate, and interruption of service for broadband traffic in a wireless network. A matrix algorithm is proposed for calculating the steady-state distribution of the model with two orbits, resumption, and waiting for the start of service for broadband traffic. A model is developed for service interruption for broadband traffic as a resource queuing system with dependent occupations of two types of resources - frame duration and signal power. The path loss model includes a piecewise-defined function for line-of-sight conditions and a maximum of several functions for non-line-of-sight conditions. The problem of maximizing the average speed for broadband traffic over speed levels and with constraints on probabilities of service interruptions and blocking for resource systems with decreasing transmission speeds is formalized and analyzed numerically.