

**РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ДРУЖБЫ НАРОДОВ
ИМЕНИ ПАТРИСА ЛУМУМБЫ**

На правах рукописи

Макеева Елена Дмитриевна

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

Специальность 1.2.3 – Теоретическая информатика, кибернетика

Диссертация
на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук

Научный руководитель
кандидат физико-математических наук
доцент
Кочеткова Ирина Андреевна

Москва – 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
ГЛАВА 1 АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ ПРИОРИТЕТНОЙ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ С МАЛОЙ ЗАДЕРЖКОЙ	12
1.1. Технические особенности сетей пятого поколения.....	12
1.2. Совместная передача широкополосного и приоритетного узкополосного трафика	15
1.3. Система массового обслуживания с двумя орбитами.....	19
1.4. Матричный алгоритм расчета стационарного распределения	24
1.5. Задача выбора параметра возобновления обслуживания трафика	31
1.6. Постановка задачи исследования	41
ГЛАВА 2 МОДЕЛЬ С ПРЕРЫВАНИЕМ ОБСЛУЖИВАНИЯ ШИРОКОПОЛОСНОГО ТРАФИКА.....	46
2.1. Модель затухания мощности сигнала и занятия ресурса	46
2.2. Функция распределения мощности затухания сигнала	48
2.3. Ресурсная система массового обслуживания с прерыванием	54
2.4. Матричный алгоритм расчета стационарного распределения	61
2.5. Алгоритм снижения размерности системы уравнений равновесия.....	66
ГЛАВА 3 МОДЕЛЬ СО СНИЖЕНИЕМ СКОРОСТИ ШИРОКОПОЛОСНОГО ТРАФИКА.....	71
3.1. Построение модели с адаптивной скоростью передачи данных.....	71
3.2. Политика занятия ресурса с адаптивным изменением мощности сигнала	73
3.3. Условное распределение вероятностей занятости ресурса	75
3.4. Численный анализ показателей эффективности передачи широкополосного трафика	79
3.5. Задача выбора уровней скорости широкополосного трафика.....	83
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	91
СПИСОК ОСНОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	92
ЛИТЕРАТУРА	94

Введение

Актуальность темы исследования. Беспроводные сети пятого поколения и последующих поколений (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. [2,17,85], Вишневский В.М. [81], Гайдамака Ю.В. [23,48,77,84], Дудин А.Н. [70,81], Кучерявый А.Е. [8], Кучерявый Е.А. [2,17,26,47,74,84], Молчанов Д.А. [2,17,26,47,74,84], Мутханна А.А. [7,8,78], Наумов В.А. [22,23,24,25,30,69], Парамонов А.И. [8,78], Самуйлов К.Е. [2,17,22,23,24,25,26,27,30,47,48,69,74,77,83,84,85], Сопин Э.С. [17,26,27,69,82,83,85], Степанов С.Н. [73,75,80], Шоргин С.Я. [82,86,88,95,97,102]. В частности, вопросом передачи узкополосного трафика занимаются ученые Бегишев В.О. [2,17], Гайдамака Ю.В. [48], Молчанов Д.А. [2,17,47,74], Парамонов А.И. [8,78], Самуйлов К.Е. [2,17,47,48], Chen N. [54], Kumar R. [13], Popovski P. [39, 66].

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. [76,77], Гайдамака Ю.В. [77], Дудин А.Н. [70,81], Моисеев А.Н. [71,72], Моисеева С.П. [28,68,71], Назаров А.А. [68], Самуйлов К.Е.

[2,17,22,23,24,25,27,30,69,77, 83], Степанов С.Н. [73,80], Цитович И.И. [67]. Развитием системы массового обслуживания с орбитами занимаются ученые Ефросинин Д.В. [89,90,91], Моисеева С.П. [28], Морозов Е.В. [89,90,91], Назаров А.А. [68], Некрасова Р.С. [89,90,91], Степанов С.Н. [73,80].

Ресурсные системы массового обслуживания и методы стохастической геометрии позволяют учитывать использование ресурсов в моделях беспроводных сетей. Большой вклад в развитие этой темы внесли такие учёные, как Гайдамака Ю.В [23], Наумов В.А. [22,23,24,25,30,69], Самуйлов К.Е. [2,17,22,23,24,25,30,47,69], Моисеева С.П. [28], Сопин Э.С. [17,26,27,69,82,83,85], Тихоненко О.М. [29], Bolla R. [18].

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 непрямой видимости. Ранее в ресурсных системах массового обслуживания применялись по одной формуле для задания затухания сигнала в зонах прямой и непрямой 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 развёртывании и работе беспроводных сетей пятого и последующих поколений. Они позволяют 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:

- международная молодежная научная конференция «Математическое и программное обеспечение информационных, технических и экономических систем» (г. Томск, ИПМКН ТГУ, 2020);
- всероссийская конференция с международным участием «Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем» (г. Москва, РУДН, 2019-2024);
- международная научная конференция «Distributed computer and communication networks: control, computation, communications» (г.Москва, РУДН, 2022).

- 4-м международный семинар «SMARTY 2024: Stochastic Modeling and Applied Research of Technology» (г. Петрозаводск, 2024)
- XV международная конференция «ICAM 2024: Новые информационные технологии в исследовании сложных структур» (Алтай, ТГУ, 2024).

Основные результаты опубликованы в ведущих научных журналах: Mathematics (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 научному проекту РУДН «Разработка моделей и алгоритмов нарезки радиоресурсов и приоритетного доступа в беспроводной сети 6G».

Публикации. Основные результаты диссертации изложены в 11 работах [92-102] в том числе в 1 издании, входящем в TOP-10 [93], в 4 изданиях, входящих в базу данных Scopus [95,97,99,100], в 1 свидетельстве о государственной регистрации программ для ЭВМ [101].

Соответствие паспорту специальности. Работа соответствует следующим пунктам паспорта научной специальности 1.2.3 «Теоретическая информатика, кибернетика»:

- п. 9 «Математическая теория исследования операций» в части исследования алгоритмов доступа широкополосного трафика в виде систем с зависимым занятием ресурса;
- п. 12 «Модели информационных процессов и структур» в части моделирования процесса совместной передачи узкополосного и широкополосного трафика;

- п. 25 «Методы высоконадежной обработки информации и обеспечения помехоустойчивости информационных коммуникаций для целей передачи, хранения и защиты информации» в части моделирования сверхнадежной передачи информации в виде приоритетного узкополосного трафика.

Личный вклад. Разработанные в диссертационной работе модели, программные средства и анализ моделей выполнены автором самостоятельно..

Объем и структура работы. Структура диссертационной работы состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы из 102 источников. Объем работы составляет 107 страниц, содержит 33 рисунка и 4 таблицы.

Краткое изложение диссертации. Работа состоит из трех глав. Во Введении отражена актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи, а также научная новизна, теоретическая и практическая ценность данной работы.

В первой главе рассматриваются основные технические особенности сетей 5G и последующих поколений, показаны модель затухания сигнала, отражены основные методы организации совместной передачи разных типов трафика в мобильных сетях, представлена модель приоритетной передачи в виде системы массового обслуживания с двумя орбитами. Раздел 1.1. посвящен основным технологическим особенностям беспроводных сетей пятого поколения, в частности сверхнадежной связи с малой задержкой и улучшенной мобильной широкополосной связи, сценариям использования беспроводных сетей. В разделе 1.2. представлен литературный обзор основных подходов, используемых для распределения ресурсов при совместной передаче широкополосного и узкополосного трафика. Раздел 1.3. посвящен модели приоритетной передачи с использованием схемы доступа с возобновлением обслуживания, которая предполагает задержку в передаче широкополосного трафика и прерывание его сессий в виде системы массового обслуживания с двумя орбитами. Эта схема также позволяет отправлять повторные запросы начать обслуживание и возобновить передачу через определённое время. Для такой модели в разделе 1.4

представлен матричный алгоритм расчета стационарных вероятностей, а раздел 1.5 посвящен численному решению задачи выбора параметров возобновления передачи широкополосного трафика.

Во второй и третьей главах описывается моделирование приоритетного обслуживания с учётом использования ресурсов в зависимости от числа обслуживаемых сессий в системе. В разделе 2.1 представлена модель мощности затухания сигнала в общем виде согласно стандарту 3GPP. В разделе 2.2 представлена формула для расчёта функции распределения мощности затухания сигнала при случайном расстоянии между пользователем и базовой станцией. При этом рассматриваются два случая: когда сигнал передается в условиях прямой и непрямой видимостях, сравниваются графики функций распределения мощности затухания сигнала. Расчёты проводились с использованием как предложенных формул, с кусочно-заданной функцией для прямой видимости и максимумом нескольких функций для непрямой видимости, так и упрощённых формул, описанных в спецификации 3GPP. В разделе 2.3 описывается схема доступа с прерыванием обслуживания широкополосного трафика при нехватке ресурсов для совместной передачи. Для этой схемы представлена модель в виде ресурсной системы массового обслуживания, учитывающая трёхмерную структуру ресурса и циклический алгоритм распределения ресурса, согласно которому длительность кадра делится в равных долях между всеми сессиями, а мощность сигнала выбирается с учетом доли кадра для достижения требуемой скорости передачи. Для предложенной системы в разделе 2.4 представлен алгоритм снижения размерности системы уравнений равновесия, а в разделе 2.5 — матричный алгоритм расчета стационарного распределения.

Глава 3 представляет схему приоритетной передачи со снижением скорости передачи широкополосного трафика, где ресурсы распределяются по взвешенному циклическому алгоритму, согласно которому длительность кадра дискриминаторно разделяется между сессиями пропорционально требованиям к скорости передачи трафика. В разделе 3.1 описана эта схема и представлена математическая модель в виде ресурсной системы массового обслуживания.

Раздел 3.2 посвящён политике распределения ресурса по взвешенному циклическому алгоритму. В разделе 3.3 приведены формулы для расчёта условных вероятностей принятия новых сессий при условии, что в системе уже обслуживаются сессии трафика. В разделе 3.4 проведён численный анализ показателей эффективности рассмотренной модели. В разделе 3.5 показано численное решение задачи выбора уровней скорости передачи широкополосного трафика в виде задачи максимизации средней скорости передачи широкополосного трафика.

В заключении сформулированы основные результаты научной работы.

ГЛАВА 1

АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ ПРИОРИТЕТНОЙ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ С МАЛОЙ ЗАДЕРЖКОЙ

1.1. Технические особенности сетей пятого поколения

Беспроводные сети пятого поколения (5G) и последующие предлагают значительные преимущества. Такие сети обеспечивают более высокую пропускную способность и скорость передачи данных, а также решают проблемы, связанные с задержкой, энергопотреблением и надежностью [1, 2, 3]. Развитие сетей привело к появлению новых сценариев использования, требующих высоких скоростей передачи данных, реализуемых для большого количества подключенных устройств и приложений со сверхнизкой задержкой и высокой надежностью [4, 5]. Один из них – массовая машинная связь (англ. Massive Machine-Type Communications, mMTC), которая позволяет подключать множество устройств, передающих небольшие объемы данных [6]. Другой сценарий – сверхнадежная связь с малой задержкой (англ. Ultra-Reliable Low Latency Communication, URLLC). Она необходима для таких задач, как, например, беспроводное управление промышленным производством, телемедицина и обеспечение транспортной безопасности. В этих случаях требуются высокая пропускная способность, низкая задержка и доступность сети [7, 8]. Наконец, улучшенная широкополосная мобильная связь (англ. Enhanced mobile broadband, eMBB) ориентирована на обычных пользователей и обеспечивает доступ к мультимедийному контенту, услугам и данным, которые требуют широкого покрытия, пригодна для высокой плотности пользователей и высоких скоростей передачи данных [9, 10, 11].

Один из основных сценариев совместной передачи широкополосного eMBB и узкополосного URLLC трафика – это сценарий «умный город». В таких городах люди, объекты и транспорт объединяются с помощью беспроводных технологий для обмена данными, улучшения дорожного движения и обеспечения безопасности [12]. В рамках этого сценария широкополосный трафик предоставляет возможность для управления дорожным движением, мониторинга окружающей среды и создания сетевой инфраструктуры. А узкополосный трафик обеспечивает связь с низкой задержкой для управления дорожным движением в режиме реального времени, обеспечения безопасности пешеходов и служб экстренной помощи [13, 14].

Для достижения более высоких скоростей передачи данных и увеличения пропускной способности беспроводных сетей пятого и последующих поколений используют терагерцовый диапазон радиочастот и миллиметровые волны [15, 16]. Однако из-за короткой длины волны сигнал блокируется и теряет мощность при прохождении через препятствия, что снижает производительность, надёжность и скорость передачи данных [17]. Чтобы соответствовать новым требованиям сетей, необходимо точно моделировать поведение электромагнитных волн и разрабатывать методы оценки производительности [18, 19, 20].

Оценить пиковую пропускную способность C , равную максимально возможной скорости передачи одной сессии, позволяет формула Шеннона-Хартли

$$C = F \log_2(1 + \text{SINR}),$$

$$\text{SINR} = \frac{P_r}{N_0 + I_0},$$

где F общая полоса частот, доступная для использования, SINR отношение уровня сигнала к уровню шума и интерференции (англ. Signal to Interference Plus Noise Ratio, SINR), N_0 мощность шума, I_0 мощность интерференции, P_r мощность принимаемого сигнала, которое согласно уравнению передачи Фрииса может быть представлено как в децибелах, так и в линейном виде следующим образом:

$$P_r[\text{dB}] = P_t[\text{dB}] + G_t[\text{dBi}] + G_r[\text{dBi}] - \text{PL}[\text{dB}],$$

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r}{\text{PL}},$$

где P_t мощность передающей антенны, G_t и G_r коэффициенты усиления передающей и приёмных антенн, PL мощность затухания сигнала, зависящая от расстояния между пользовательским устройством (ПУ) и базовой станцией (БС) в трехмерном измерении $D(d) = \sqrt{d^2 + |h_{\text{BS}} - h_{\text{UT}}|^2}$, где d расстояние между ПУ и БС в двухмерном измерении, h_{BS} и h_{UT} высоты БС и ПУ соответственно [17, 18, 21].

Мощность затухания сигнала PL имеет вид

$$\text{PL}(d)[\text{dB}] = \alpha[\text{dB}] + \beta \log_{10} D(d),$$

и выполнив переход к линейному виду следующим образом

$$\begin{aligned} \text{PL}(d) &= 10^{\frac{\alpha[\text{dB}] + \beta[\text{dB}] \log_{10} D(d)}{10}} = 10^{\frac{\alpha[\text{dB}]}{10}} 10^{\frac{\beta[\text{dB}] \log_{10} D(d)}{10}} = \\ &= 10^{\frac{\alpha[\text{dB}]}{10}} 10^{\frac{\beta[\text{dB}]}{10} \log_{10} D(d)} = 10^{\alpha_{\text{dB}}} D^{\frac{\beta[\text{dB}]}{10}}(d), \end{aligned}$$

получим модель затухания в линейном виде:

$$\text{PL}(d) = \alpha D^{\beta}(d), \tag{1.1}$$

где α, β коэффициенты модели затухания – константы из спецификации 3GPP TR 38.901 [21] для каждого сценария развертывания сети.

Для анализа производительности беспроводных сетей и учёта использования ресурсов авторы работ [22 – 30] используют ресурсные системы массового обслуживания. Как правило, занятие разных типов ресурса производится независимо друг от друга. В данной работе рассматривается зависимое занятие двух типов ресурса – мощности сигнала и длительности кадра, в зависимости от выбранного алгоритма и числа обслуживаемых сессий в системе.

На протяжении обучения в аспирантуре автором также были опубликованы работы на тему отличной от темы диссертационной работы. Так в работе [31], опубликованной в журнале TOP-10, исследуется процесс загрузки файла в пределах одного сегмента сети в виде системы массового обслуживания с эластичным трафиком и нестационарными интенсивностями. Работа [32] посвящена уникальным характеристикам радиосигнала, а также исследованию свойств самоподобия сигнала с помощью индекса Хёрста. А работа [33] относится к анализу способов противодействия киберугрозам в сетях связи с помощью простейшей модели системы обнаружения киберугроз в виде цепи Маркова.

1.2. Совместная передача широкополосного и приоритетного узкополосного трафика

Сосуществование различных сценариев использования требует предоставления разнообразных услуг с разными требованиями к качеству обслуживания. К таким услугам относятся узкополосный и широкополосный трафик [34, 35, 36]. В связи с этим возникает вопрос о том, как настроить сеть радиодоступа, чтобы она наилучшим образом поддерживала общие требования к производительности, которые определяются комбинацией требований обрабатываемых услуг. Например, ресурсы широкополосного трафика распределяются динамически, а ресурсы узкополосного трафика должны обеспечивать низкую задержку при передаче данных и высокую надежность [37, 38].

В контексте совместной передачи широкополосного и узкополосного трафика существует несколько основных подходов [13]. Одним из распространённых является нарезка сети, которая рассмотрена в работах [39, 40, 41, 42]. В этих источниках предлагается разделить канал на сегменты, чтобы эффективно распределить ресурсы между разными типами трафика, изолировать их друг от друга и обеспечить определённую производительность. Однако в этом

случае есть вероятность неэффективного использования канала, например, когда запросы начать обслуживание поступают в систему нечасто.

Еще одним из подходов является распределение ресурсов с помощью методов машинного обучения. Примером являются модели совместной передачи, предложенные в работах [43, 44]. Эти модели используют глубокое обучение и позволяют находить оптимальные решения. Такие подходы могут эффективно решать недетерминированные задачи и принимать решения в режиме реального времени. Они помогают в распределении ресурсов и принятии решений в условиях неопределённости, как описано в работе [45].

Наиболее часто встречаемым подходом является мультиплексирование радиочастотного канала [46]. В рамках которого ресурсный канал делится на ресурсные блоки (англ. Physical Resource Block – PRB) и имеет структуру согласно Рис. 1.1: каждый блок разделен по времени на символы, использующие технологию ортогонального частотного разделения каналов (англ. Orthogonal Frequency-Division Multiplexing - OFDM), а по частоте – на поднесущие [14].

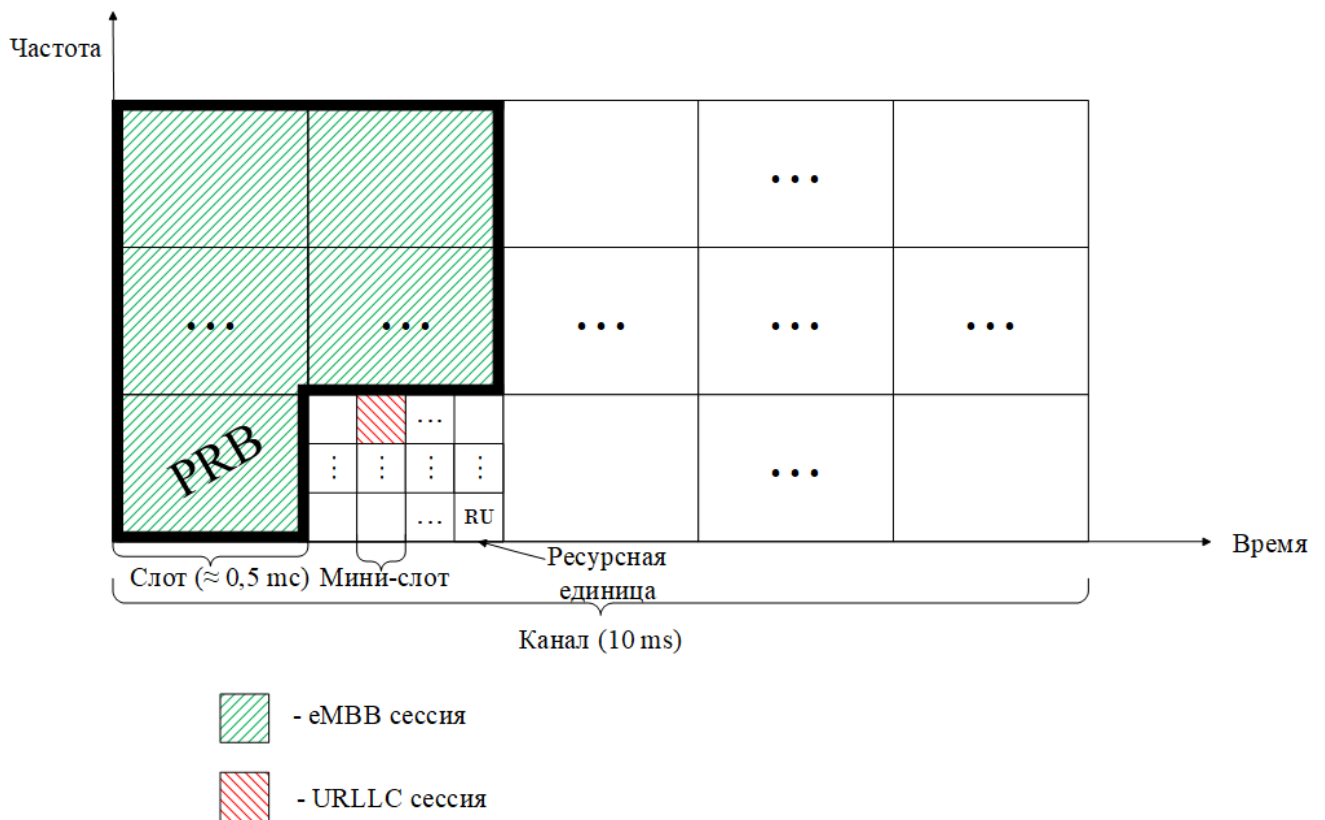


Рис. 1.1 Структура ресурсного канала

БС нового поколения могут адаптироваться к разным требованиям и характеристикам канала благодаря изменению ширины спектра поднесущей: 15 кГц, 30 кГц, 60 кГц, 120 кГц и 240 кГц. Длительность слотов зависит от выбранной ширины и вида трафика. Например, если передается узкополосный трафик, требующий высокую надежность, используются поднесущие с широким спектром и короткими слотами. Если передаётся широкополосный трафик – «узкие» поднесущие. При ширине спектра 15 кГц и длительности слота 1 мс планирование сессии широкополосного трафика начинается в начале слота. Сессии узкополосного трафика планируются сразу после поступления. Поэтому структура кадра 5G подразумевает наличие мини-слотов, в начале которых размещаются поступившие сессии узкополосного трафика [13].

Узкополосный трафик обычно имеет приоритет из-за строгих требований к задержке, что может повлиять на передачу широкополосного трафика [13, 47, 48], приводя к задержкам, прерываниям обслуживания или снижению скорости передачи [49, 50, 51]. В исследованиях [52, 53] происходит снижение пропускной способности. Степень воздействия может варьироваться в зависимости от используемых схем доступа и сценария использования.

В Табл. 1.1 представлен обзор недавних статей, посвящённых совместной передаче узкополосного и широкополосного трафика. В ней отражены основные подходы к совместному использованию ресурса и показано, как приоритетный трафик влияет на передачу широкополосного трафика.

Табл. 1.1 Особенности совместного обслуживания узкополосного и широкополосного трафика

Ссылка	Влияние на широкополосный трафик	Подход
[52, 53, 54, 55, 56]	Снижение пропускной способности	Мультиплексирование
[49]	Задержка передачи, снижение общей скорости передачи	
[50, 57, 58]	Снижение скорости передачи	

[51, 59]	Прерывание передачи	
[40]	Снижение мощности передачи	Нарезка сети
[60, 61]	Снижение пропускной способности	
[62]	Прерывание передачи	
[63]	Снижение скорости передачи	Предоставление параметров эффективности
[64]	Снижение скорости передачи	Машинное обучение
[65]	Прерывание передачи	
[66]	Снижение скорости передачи	Облачная сеть радиодоступа

Для анализа работы беспроводных сетей широко применяются методы теории массового обслуживания [67 – 75], математической теории телетрафика [76 – 80] и теории случайных процессов [81 – 86]. В отношении совместной передачи широкополосного и узкополосного трафика с учетом приоритета второго авторами из РУДН [47, 48] использовался аппарат теории массового обслуживания в контексте приложений в промышленной среде, где рассматривается один тип ресурса – отношение мощности сигнала к шуму и интерференции.

В рамках данной работы исследуются различные схемы доступа с использованием технологии мультиплексирования. В таких схемах приоритет отдаётся узкополосному трафику, что может привести к негативным последствиям для широкополосного трафика, таким как прерывание, снижение скорости и задержка. В работах [87, 88] представлены простейшие модели с прерыванием обслуживания и снижением скорости передачи широкополосного трафика без учета занятия ресурса.

1.3. Система массового обслуживания с двумя орбитами

В первой главе в разделах 1.3–1.5 изложен результат №1 диссертационной работы. Основная цель данных разделов – описание модели приоритетного доступа для узкополосного трафика с возможностью возобновления обслуживания широкополосного трафика. Эта модель представляет собой систему массового обслуживания с двумя орбитами [89 – 91]. Особенность в том, что после прерывания широкополосного трафика, он предпринимает попытки возобновить обслуживание. Кроме того, новые запросы начать обслуживание широкополосного трафика могут быть задержаны для повторной отправки запроса начать обслуживание [93 – 95].

Перейдем к построению модели с возобновлением обслуживания широкополосного трафика с использованием схемы доступа, которая в случае занятости канала предполагает задержку в передаче широкополосного трафика и прерывание его сессий для начала обслуживания новой сессии узкополосного трафика. В этой модели рассмотрим соту с БС, которая имеет два буфера для широкополосного трафика. Схема такой соты показана на Рис. 1.2, а схема доступа модели продемонстрирована на Рис. 1.3.

В рамках математической модели запросы широкополосного и узкополосного трафика начать обслуживание поступают согласно пуассоновскому потоку с параметрами λ_m и λ_u , длительность сессий распределена согласно экспоненциальному закону распределения со средними значениями μ_m^{-1} и μ_u^{-1} соответственно. Отметим, что длительность сессий узкополосного трафика гораздо меньше по сравнению с широкополосным трафиком, т. е. $\mu_m^{-1} \gg \mu_u^{-1}$.

Пропускная способность такой системы равна C . Предположим, что каждая сессия широкополосного трафика передаёт данные со скоростью b , а каждая сессия узкополосного трафика — со скоростью $d=1$. Тогда максимальное число

обслуживаемых сессий широкополосного трафика в системе будет равно $N = C / b$.

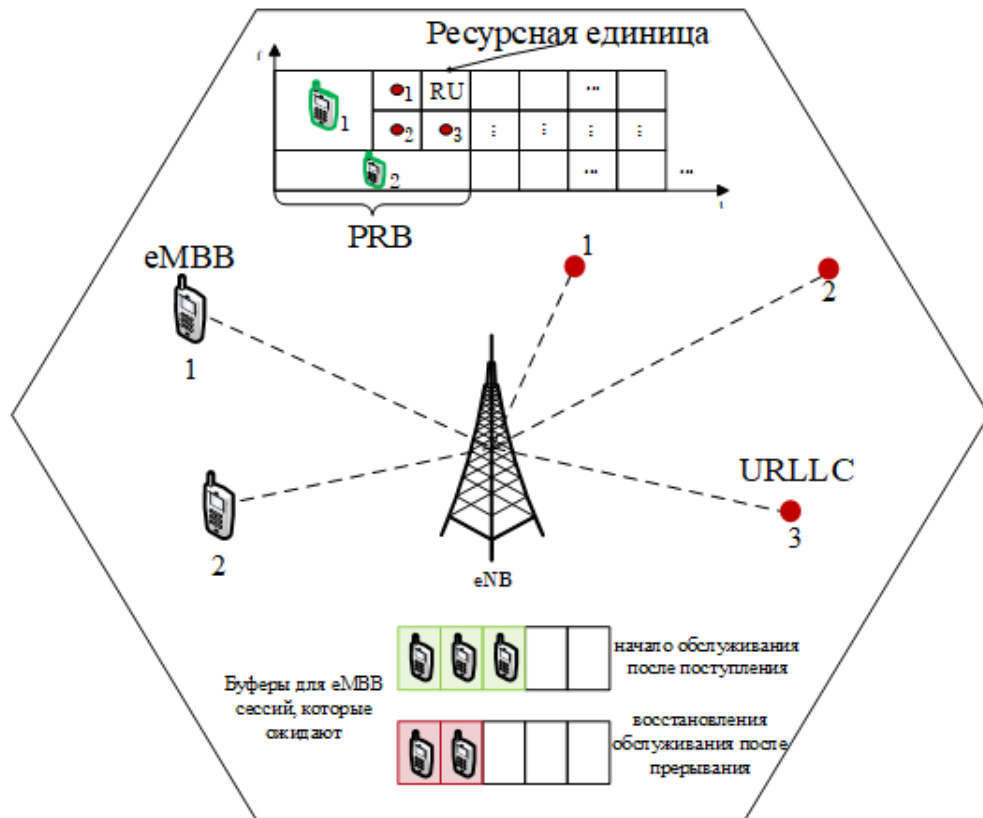


Рис. 1.2 Схема сценария с возобновлением обслуживания широкополосного трафика

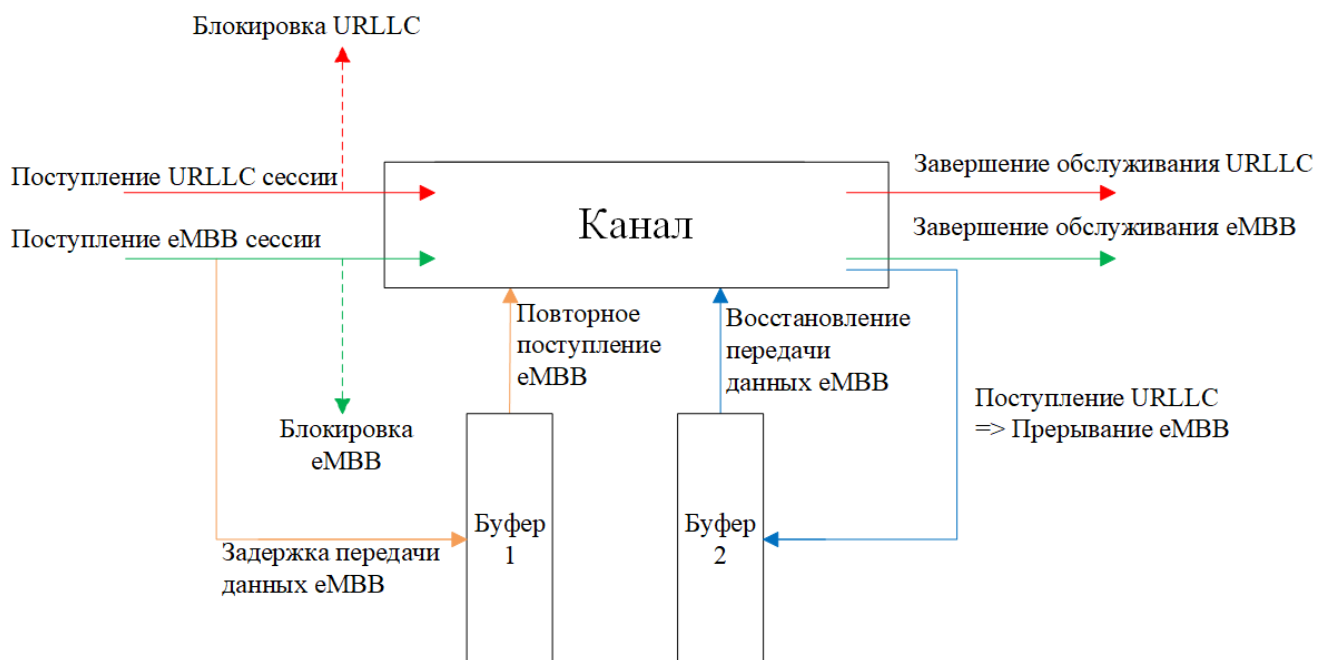


Рис. 1.3 Схема доступа модели с возобновлением обслуживания широкополосного трафика

Широкополосный трафик отправляет повторные запросы начать обслуживание и повторные попытки возобновить передачу сессий через экспоненциально распределенное время с интенсивностями $\gamma_1 > 0$ и $\gamma_2 > 0$.

Таким образом, данная система представима в виде системы массового обслуживания с двумя орбитами размерностями C_1 и C_2 соответственно, где $C_1 \geq N$, $C_2 = N$.

Сессии на орбитах выстраиваются по принципу «первым пришёл - первым обслужен» (FCFS). Вторая орбита имеет приоритет: если на двух орбитах есть сессии и освобождается необходимый ресурс, то сначала будет обслуживаться прерванная сессия со второй орбиты. Схема этой системы представлена на Рис. 1.4.

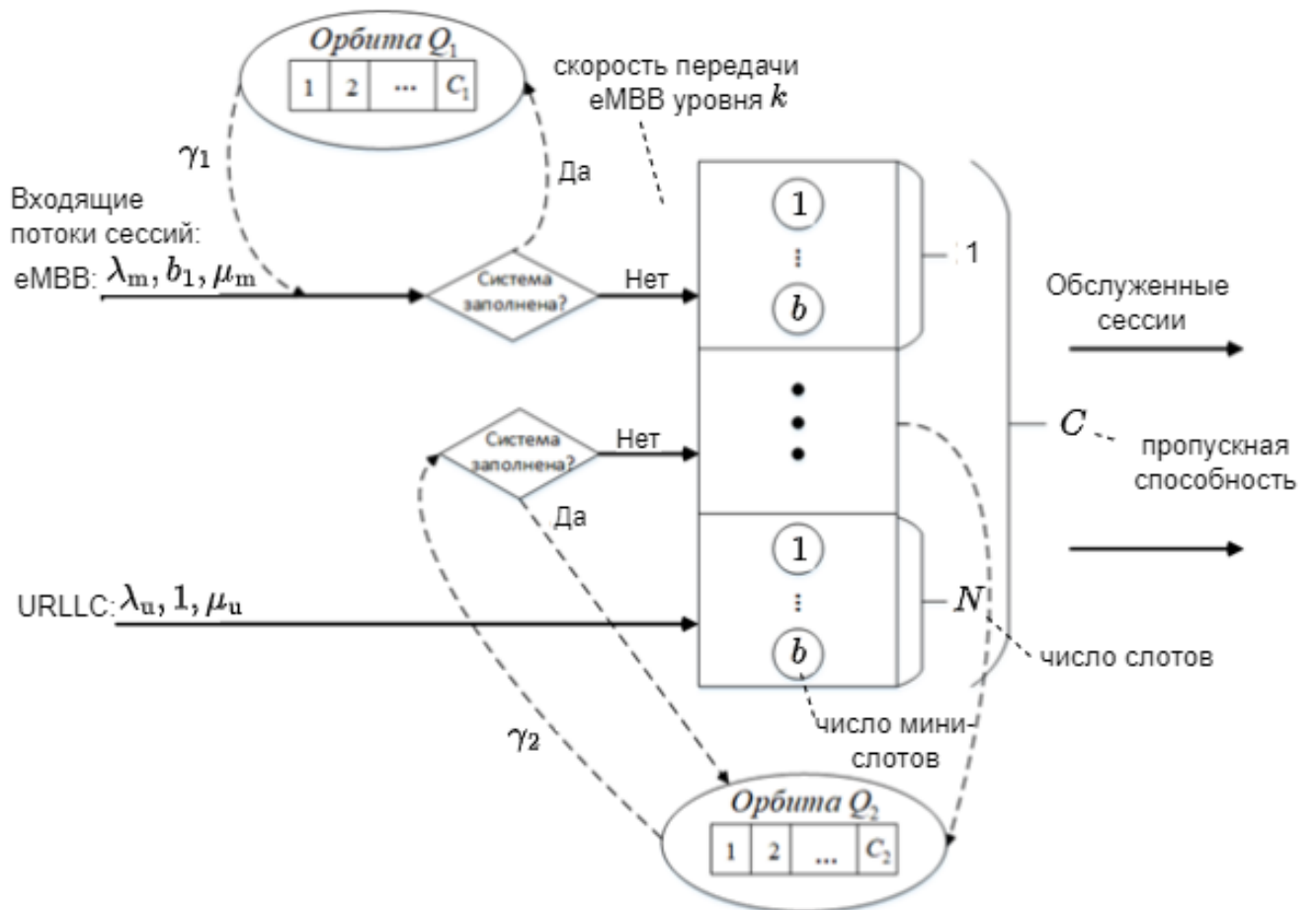


Рис. 1.4 Схема СМО с возобновлением обслуживания широкополосного трафика

Модель описывается четырёхмерным марковским случайным процессом $\mathbf{X}(t)$, $t \geq 0$, с состояниями (n_m, n_u, q_1, q_2) , где n_m число обслуживаемых сессий широкополосного трафика, n_u число обслуживаемых сессий узкополосного трафика, q_1 число задержанных запросов широкополосного трафика, q_2 число прерванных сессий широкополосного трафика.

Пространство состояний имеет следующий вид:

$$\mathcal{X} = \left\{ (n_m, n_u, q_1, q_2) : n_m \geq 0, n_u \geq 0, 0 \leq q_1 \leq C_1, 0 \leq q_2 \leq C_2, \right. \\ \left. bn_m + n_u \leq C, n_m + q_2 \leq N \right\}, \quad (1.2)$$

Диаграмма интенсивностей переходов для произвольного состояния $(n_m, n_{ll}, q_1, q_2) \in \mathcal{X}$ показана на Рис. 1.5:

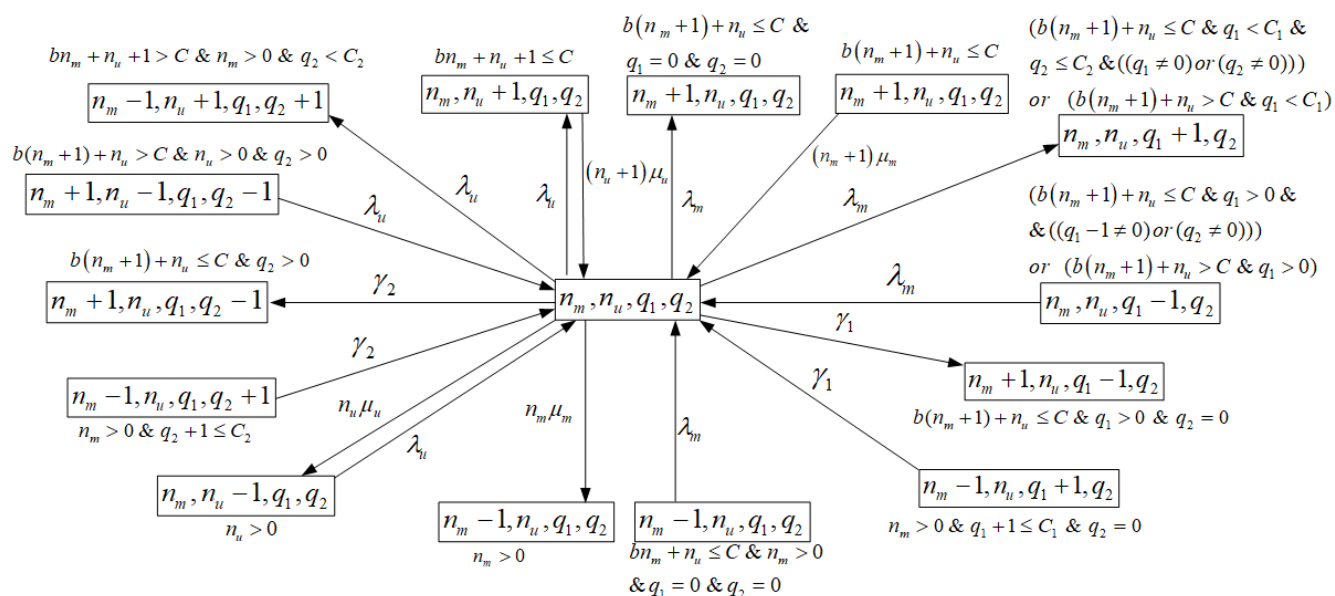


Рис. 1.5 Диаграмма переходов для центрального состояния $(n_m, n_u, q_1, q_2) \in \mathcal{X}$

модели с возобновлением обслуживания

Из диаграммы интенсивностей переходов элементы инфинитезимальной матрицы для произвольного состояния $(n_m, n_u, q_1, q_2) \in \mathcal{X}$ имеют вид:

$$\left\{ \begin{array}{ll} a(n_m, n_u, q_1, q_2)(n_m, n_u + 1, q_1, q_2) = \lambda_u, & bn_m + n_u + 1 \leq C, \\ a(n_m, n_u, q_1, q_2)(n_m - 1, n_u + 1, q_1, q_2 + 1) = \lambda_u, & bn_m + n_u + 1 > C, n_m > 0, q_2 < C_2, \\ a(n_m, n_u, q_1, q_2)(n_m + 1, n_u, q_1, q_2) = \lambda_m, & b(n_m + 1) + n_u \leq C, q_1 = 0, q_2 = 0, \\ a(n_m, n_u, q_1, q_2)(n_m, n_u, q_1 + 1, q_2) = \lambda_m, & b(n_m + 1) + n_u \leq C, q_1 < C_1, \\ & q_2 \leq C_2, ((q_1 \neq 0) \text{ или } (q_2 \neq 0)) \\ & \text{или} \\ & b(n_m + 1) + n_u > C, q_1 < C_1, \\ a(n_m, n_u, q_1, q_2)(n_m + 1, n_u, q_1 - 1, q_2) = \gamma_1, & b(n_m + 1) + n_u \leq C, q_1 > 0, q_2 = 0, \\ a(n_m, n_u, q_1, q_2)(n_m + 1, n_u, q_1, q_2 - 1) = \gamma_2, & b(n_m + 1) + n_u \leq C, q_2 > 0, \\ a(n_m, n_u, q_1, q_2)(n_m, n_u - 1, q_1, q_2) = n_u \mu_u, & n_u > 0, \\ a(n_m, n_u, q_1, q_2)(n_m - 1, n_u, q_1, q_2) = n_m \mu_m, & n_m > 0. \end{array} \right. \quad (1.3)$$

Зная стационарные распределения $\pi(n_m, n_u, q_1, q_2)$, $(n_m, n_u, q_1, q_2) \in \mathcal{X}$ можно рассчитать следующие показатели эффективности широкополосного трафика:

1. Вероятность того, что новый запрос будет задержан,:

$$P_{q_1} = \sum_{(n_m, n_u, q_1, q_2) \in \mathcal{X}_{q_1}} \pi(n_m, n_u, q_1, q_2),$$

где

$$\mathcal{X}_{q_1} = (n_m, n_u, q_1, q_2) \in \mathcal{X} : (b(n_m + 1) + n_u \leq C, q_1 < C_1, q_2 \leq C_2, ((q_1 \neq 0) \text{ или } (q_2 \neq 0))) \text{ или } (b(n_m + 1) + n_u > C \& q_1 < C_1).$$

множество состояний, при которых новые запросы будут задержаны и отправлены на первую орбиту.

2. Вероятность прерывания обслуживания сессий P^{in} :

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

3. Вероятность блокировки нового запроса:

$$p_m^{\text{bl}} = \sum_{n_m=0}^N \sum_{n_u=0}^C \sum_{q_2=0}^{C_2} \pi(n_m, n_u, C_1, q_2).$$

4. Среднее число обслуживаемых сессий:

$$\overline{n_m} = \sum_{n_m=1}^N n_m \sum_{n_u=0}^{C-bn_m} \sum_{q_1=0}^{C_1} \sum_{q_2=0}^{C_2} \pi(n_m, n_u, q_1, q_2).$$

5. Среднее число задержанных запросов:

$$\overline{q_1} = \sum_{q_1=1}^{C_1} q_1 \sum_{n_m=0}^N \sum_{n_u=0}^{C-bn_m} \sum_{q_2=0}^{C_2} \pi(n_m, n_u, q_1, q_2).$$

6. Среднее число прерванных сессий:

$$\overline{q_2} = \sum_{q_2=1}^{C_2} q_2 \sum_{n_m=0}^N \sum_{n_u=0}^{C-bn_m} \sum_{q_1=0}^{C_1} \pi(n_m, n_u, q_1, q_2).$$

1.4. Матричный алгоритм расчета стационарного распределения

Поскольку система уравнений равновесий (СУР) имеет большую размерность, в этом разделе сформулировано и доказано утверждение, которое представляет матрицу интенсивностей переходов Λ в трехдиагональном блочном виде. Затем сформулирована и доказана лемма о нахождении стационарного распределения вероятностей с использованием линейных преобразований $\pi\Lambda = \mathbf{0}$, $\pi e^T = 1$.

Утверждение 1.1. Если на множестве $\mathcal{X}$ (1.2) введен лексикографический порядок

$$\begin{aligned} \mathbf{x}' = (n'_m, n'_u, q'_1, q'_2) \succ (n_m, n_u, q_1, q_2) = \mathbf{x} \Leftrightarrow \\ (q'_1 > q_1) \text{ или } (q'_1 = q_1, q'_2 > q_2) \text{ или } (q'_1 = q_1, q'_2 = q_2, n'_m > n_m) \text{ или} \\ (q'_1 = q_1, q'_2 = q_2, n'_m = n_m, n'_u > n_u), \end{aligned} \quad (1.4)$$

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

$$\mathbf{\Lambda} = \begin{pmatrix} \mathbf{\Lambda}_{00} & \mathbf{\Lambda}_{11} & \mathbf{0} & . & \mathbf{0} \\ \mathbf{\Lambda}_{21} & \mathbf{\Lambda}_{01} & \mathbf{\Lambda}_{12} & . & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{\Lambda}_{22} & . & . & \mathbf{0} \\ . & . & . & . & \mathbf{\Lambda}_{1C_1} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{\Lambda}_{2C_1} & \mathbf{\Lambda}_{0C_1} \end{pmatrix}, \quad (1.5)$$

где блоки матрицы $\mathbf{\Lambda}$ имеют размерности:

$$\begin{aligned} \dim \mathbf{\Lambda}_{ik} : A^2, \quad i=0, k=\overline{0, C_1}, \\ i=1, 2, k=\overline{1, C_1}, \end{aligned} \quad (1.6)$$

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

а ненулевые положительные элементы матриц $\mathbf{\Lambda}_{0k}, \mathbf{\Lambda}_{1k}, \mathbf{\Lambda}_{2k}$ вычисляются по формулам

$$\mathbf{\Lambda}_{0k}(\mathbf{x}, \mathbf{x}') = \begin{cases} \lambda_u, & n'_m = n_m, \quad n'_u = n_u + 1, \quad q'_1 = q_1, \quad q'_2 = q_2 \quad \text{или} \\ & n'_m = n_m - 1, \quad n'_u = n_u + 1, \quad q'_1 = q_1, \quad q'_2 = q_2 + 1, \\ n_u \mu_u, & n'_m = n_m, \quad n'_u = n_u - 1, \quad q'_1 = q_1, \quad q'_2 = q_2, \\ \lambda_m, & n'_m = n_m + 1, \quad n'_u = n_u, \quad q'_1 = q_1 = 0, \quad q'_2 = q_2 = 0, \\ n_m \mu_m, & n'_m = n_m - 1, \quad n'_u = n_u, \quad q'_1 = q_1, \quad q'_2 = q_2, \\ \gamma_2, & n'_m = n_m + 1, \quad n'_u = n_u, \quad q'_1 = q_1, \quad q'_2 = q_2 - 1. \end{cases} \quad (1.7)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{\Lambda}_{1k}(\mathbf{x}, \mathbf{x}') = \lambda_m, \quad n'_m = n_m, \quad n'_u = n_u, \quad q'_1 = q_1 + 1, \quad q'_2 = q_2, \\ (q_1 \neq 0 \quad \text{или} \quad q_2 \neq 0). \end{aligned} \quad (1.8)$$

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

Доказательство. Поскольку на множестве $\mathcal{X}$ определён лексикографический порядок (1.4), сортировка состояний на этом множестве выполняется в четыре этапа.

Первый этап – сортировка состояний по возрастанию числа задержанных запросов широкополосного трафика q_1 . Другими словами, если выполняется

условие $q'_1 > q_1$, то $(n'_m, n'_u, q'_1, q'_2) > (n_m, n_u, q_1, q_2)$, где

$(n'_m, n'_u, q'_1, q'_2), (n_m, n_u, q_1, q_2) \in \mathcal{X}_k$, . Таким образом, пространство состояний

делится на подмножества, которые обозначаются как

$$\mathcal{X}_k = \{(n_m, n_u, q_1, q_2) \in \mathcal{X} : q_1 = k\}, k = \overline{0, C_1}, \mathcal{X} = \bigcup_{k=0}^{C_1} \mathcal{X}_k \text{ где:}$$

$$\mathcal{X}_0 = \left\{ \begin{array}{l} (0, 0, 0, 0), (0, 1, 0, 0), \dots, (0, C, 0, 0), \\ (1, 0, 0, 0), (1, 1, 0, 0), \dots, (N, C - bN, 0, 0), \\ (0, 0, 0, 1), \dots, (0, C, 0, C_2) \end{array} \right\}$$

$$\mathcal{X}_1 = \left\{ \begin{array}{l} (0, 0, 1, 0), (0, 1, 1, 0), \dots, (0, C, 1, 0), \\ (1, 0, 1, 0), \dots, (N, C - bN, 1, 0), \\ (0, 0, 1, 1), \dots, (0, C, 1, C_2) \end{array} \right\}$$

$$\mathcal{X}_2 = \left\{ \begin{array}{l} (0, 0, 2, 0), (0, 1, 2, 0), \dots, (0, C, 2, 0), \\ (1, 0, 2, 0), \dots, (N, C - bN, 2, 0), \\ (0, 0, 2, 1), \dots, (0, C, 2, C_2) \end{array} \right\}$$

$\vdots$

$$\mathcal{X}_{C_1} = \left\{ \begin{array}{l} (0, 0, C_1, 0), (0, 1, C_1, 0), \dots, (0, C, C_1, 0), \\ (1, 0, C_1, 0), \dots, (N, C - bN, C_1, 0), \\ (0, 0, C_1, 1), \dots, (0, C, C_1, C_2) \end{array} \right\}$$

Отсюда следует, что подмножество $\mathcal{X}_k, k = \overline{0, C_1}$ имеет вид

$$\mathcal{X}_k = \{(0, 0, k, 0), \dots, (n_m, n_u, k, q_2), \dots, (0, C, k, C_2)\}.$$

На втором этапе сортировки упорядочиваются состояния внутри каждого подмножества $\mathcal{X}_k, k = \overline{0, C_1}$ по возрастанию числа прерванных сессий q_2 , т. е.

$$(n'_m, n'_u, q'_1, q'_2) > (n_m, n_u, q_1, q_2) \Leftrightarrow (n'_m = n_m, n'_u = n_u, q'_1 = q_1, q'_2 > q_2).$$

Третий этап – по возрастанию числа обслуживающихся сессий широкополосного трафика n_m :

$$(n'_m, n'_u, q'_1, q'_2) > (n_m, n_u, q_1, q_2) \Leftrightarrow (n'_m > n_m, n'_u = n_u, q'_1 = q_1, q'_2 = q_2).$$

Наконец, четвертый этап – по возрастанию числа обслуживаемых сессий узкополосного трафика n_u :

$$(n'_m, n'_u, q'_1, q'_2) > (n_m, n_u, q_1, q_2) \Leftrightarrow (n'_m = n_m, n'_u > n_u, q'_1 = q_1, q'_2 = q_2).$$

Таким образом, ненулевые элементы матрицы Λ , которые определяют переходы СП от одного события к другому, расположены следующим образом:

- Элементы блоков Λ_{1k} , расположенных над главной диагональю матрицы, представляют переходы СП из состояний множества $\mathcal{X}_{k-1}$ в состояния множества $\mathcal{X}_k$, $k = \overline{1, C_1}$.
- Элементы блоков Λ_{2k} , расположенных под главной диагональю матрицы, представляют переходы СП из состояний множества $\mathcal{X}_k$ в состояния множества $\mathcal{X}_{k-1}$, $k = \overline{1, C_1}$.
- Элементы блоков Λ_{0k} , представляющие центральную диагональ матрицы, описывают переходы СП внутри множества $\mathcal{X}_k$, $k = \overline{0, C_1}$.

Соответственно, ненулевые элементы блоков будут определяться по формулам (1.7) – (1.8), которые можно получить, используя данные построения. Ненулевой элемент по диагонали представляет собой сумму всех «выходящих» интенсивностей из определённого состояния со знаком минус.

Согласно пространству состояний системы $\mathcal{X}$ (1.2) и разбиению множества $\mathcal{X}$ на подмножества $\mathcal{X}_k$, где $k = q_1$, $0 \leq q_1 \leq C_1$, тогда $k = \overline{0, C_1}$. Далее элементы подмножества $\mathcal{X}_k$ сортируются по числу q_2 , где $0 \leq q_2 \leq C_2$. Затем фиксируется число q_2 и для каждого значения элементы подмножества $\mathcal{X}_k$ сортируются по числу n_m , где $0 \leq n_m \leq N - q_2$. Наконец, фиксируются числа q_2 , n_m и для каждой пары значений элементы подмножества $\mathcal{X}_k$ сортируются по n_u , где

$0 \leq n_u \leq C - bn_m$. Исходя из указанного выше размерность блоков Λ_{ik} , $i = \overline{1,3}$ равна соотношению (1.6).

Утверждение доказано. $\square$

Для расчета стационарного распределения разделим макро-вектор стационарных вероятностей состояний

$$\pi = (\pi(0,0,0,0), \pi(0,0,1,0), \dots, \pi(0,0,q_1,0), \dots, \pi(n_m, n_u, q_1, q_2)),$$

где $(n_m, n_u, q_1, q_2) \in \mathcal{X}$, согласно лексикографическому порядку (1.4) на

π_k , $k = \overline{1, C_1}$ компонент следующим образом:

$$\pi_0 = \begin{pmatrix} \pi(0,0,0,0), \pi(0,1,0,0), \dots, \pi(0,C,0,0), \\ \pi(1,0,0,0), \pi(1,1,0,0), \dots, \pi(N, C - bN, 0, 0), \\ \pi(0,0,0,1), \dots, \pi(0,C,0,C_2) \end{pmatrix}$$

$$\pi_1 = \begin{pmatrix} \pi(0,0,1,0), \pi(0,1,1,0), \dots, \pi(0,C,1,0), \\ \pi(1,0,1,0), \dots, \pi(N, C - bN, 1, 0), \\ \pi(0,0,1,1), \dots, \pi(0,C,1,C_2) \end{pmatrix}$$

$\vdots$

$$\pi_{C_1} = \begin{pmatrix} \pi(0,0,C_1,0), \pi(0,1,C_1,0), \dots, \pi(0,C,C_1,0), \\ \pi(1,0,C_1,0), \dots, \pi(N, C - bN, C_1, 0), \\ \pi(0,0,C_1,1), \dots, \pi(0,C,C_1,C_2) \end{pmatrix}$$

Отсюда следует, что компонента π_k имеет вид

$$\pi_k = \begin{pmatrix} \pi(0,0,k,0), \pi(0,1,k,0), \dots, \pi(0,C,k,0), \\ \pi(1,0,k,0), \dots, \pi(N, C - bN, k, 0), \\ \pi(0,0,k,1), \dots, \pi(0,C,k,C_2) \end{pmatrix}, \quad k = \overline{0, C_1}.$$

Тогда макро-вектор стационарных вероятностей π удовлетворяет конечной системе $\pi\Lambda = \mathbf{0}$, $\pi e^T = 1$.

Лемма 1.1. Стационарные вероятности состояний модели с двумя орбитами вычисляются в матричном виде по формуле

$$\pi_k = \pi_{C_1} \prod_{j=1}^{N-k} \mathbf{M}_{C_1-j}, \quad k = \overline{0, C_1-1}, \quad (1.9)$$

где вектор π_{C_1} является единственным решением системы уравнений

$$\begin{cases} \pi_{C_1} \sum_{k=0}^{C_1} \prod_{j=1}^{C_1-k} \mathbf{M}_{C_1-j} \mathbf{e}^T = 1, \\ \pi_{C_1} (\mathbf{M}_{C_1-1} \Lambda_{1C_1} + \Lambda_{0C_1}) = \mathbf{0}, \end{cases} \quad (1.10)$$

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

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_0 &= -\Lambda_{21} \Lambda_{00}^{-1}, \\ \mathbf{M}_k &= -\Lambda_{2,k+1} (\mathbf{M}_{k-1} \Lambda_{1k} + \Lambda_{0k})^{-1}, \quad k = \overline{1, C_1-1}. \end{aligned} \quad (1.11)$$

Доказательство. Запишем СУР в матричном виде согласно диаграмме интенсивностей (1.3)

$$\begin{aligned} \pi_0 \Lambda_{00} + \pi_1 \Lambda_{21} &= \mathbf{0}, \\ \pi_{k-1} \Lambda_{1k} + \pi_k \Lambda_{0k} + \pi_{k+1} \Lambda_{2k+1} &= \mathbf{0}, \quad k = \overline{1, C_1-1}, \\ \pi_{C_1-1} \Lambda_{1C_1} + \pi_{C_1} \Lambda_{0C_1} &= \mathbf{0}. \end{aligned}$$

Выразим π_0 из первого уравнения СУР

$$\begin{aligned} \pi_0 \Lambda_{00} &= -\pi_1 \Lambda_{21} \\ \pi_0 &= -\pi_1 \Lambda_{21} \Lambda_{00}^{-1}, \end{aligned}$$

обозначим $-\Lambda_{21} \Lambda_{00}^{-1} = \mathbf{M}_0$, тогда $\pi_0 = \pi_1 \mathbf{M}_0$.

Далее выразим π_1 из второго уравнения СУР

$$\begin{aligned} \pi_0 \Lambda_{11} + \pi_1 \Lambda_{01} + \pi_2 \Lambda_{22} &= \mathbf{0} \\ \pi_1 \mathbf{M}_0 \Lambda_{11} + \pi_1 \Lambda_{01} + \pi_2 \Lambda_{22} &= \mathbf{0} \\ \pi_1 (\mathbf{M}_0 \Lambda_{11} + \Lambda_{01}) + \pi_2 \Lambda_{22} &= \mathbf{0} \\ \pi_1 &= -\pi_2 \Lambda_{22} (\mathbf{M}_0 \Lambda_{11} + \Lambda_{01})^{-1}, \end{aligned}$$

обозначим $-\Lambda_{22} (\mathbf{M}_0 \Lambda_{11} + \Lambda_{01})^{-1} = \mathbf{M}_1$, тогда $\pi_1 = \pi_2 \mathbf{M}_1$.

Затем выразим π_2 аналогичным способом:

$$\pi_1 \Lambda_{12} + \pi_2 \Lambda_{02} + \pi_3 \Lambda_{23} = \mathbf{0}$$

$$\pi_2 \mathbf{M}_1 \Lambda_{12} + \pi_2 \Lambda_{02} + \pi_3 \Lambda_{23} = \mathbf{0}$$

$$\pi_2 (\mathbf{M}_1 \Lambda_{12} + \pi_2 \Lambda_{02}) = -\pi_3 \Lambda_{23}$$

$$\begin{aligned} \pi_2 &= -\pi_3 \Lambda_{23} (\mathbf{M}_1 \Lambda_{12} + \pi_2 \Lambda_{02})^{-1} = \\ &= \left[\text{пусть } -\Lambda_{23} (\mathbf{M}_1 \Lambda_{12} + \pi_2 \Lambda_{02})^{-1} = \mathbf{M}_2 \right] = \pi_3 \mathbf{M}_2. \end{aligned}$$

Далее выразим π_{C_1-1}

$$\pi_{C_1-2} \Lambda_{1,C_1-1} + \pi_{C_1-1} \Lambda_{0,C_1-1} + \pi_{C_1} \Lambda_{1,C_1} = \mathbf{0}$$

$$\pi_{C_1-1} \mathbf{M}_{C_1-2} \Lambda_{1,C_1-2} + \pi_{C_1-1} \Lambda_{0,C_1-1} + \pi_{C_1} \Lambda_{1,C_1} = \mathbf{0}$$

$$\begin{aligned} \pi_{C_1-1} &= -\pi_{C_1} \Lambda_{1,C_1} (\mathbf{M}_{C_1-2} \Lambda_{1,C_1-2} + \Lambda_{0,C_1-1})^{-1} = \\ &= \left[\text{пусть } -\Lambda_{1(C_1-1)} (\mathbf{M}_{C_1-2} \Lambda_{1,C_1-2} + \Lambda_{0,C_1-1})^{-1} = \mathbf{M}_{C_1-1} \right] = \pi_{C_1} \mathbf{M}_{C_1-1}. \end{aligned}$$

Наконец, выразим π_{C_1}

$$\pi_{C_1-1} \Lambda_{1C_1} + \pi_{C_1} \Lambda_{0C_1} = \mathbf{0}$$

$$\pi_{C_1} \mathbf{M}_{C_1-1} \Lambda_{1C_1} + \pi_{C_1} \Lambda_{0C_1} = \mathbf{0}$$

$$\pi_{C_1} (\mathbf{M}_{C_1-1} \Lambda_{1C_1} + \Lambda_{0C_1}) = \mathbf{0}.$$

Тогда получаем, что каждая компонента может быть вычислена следующим образом

$$\pi_k = \pi_{k+1} \mathbf{M}_k, \quad k = \overline{0, C_1 - 1},$$

где матрицы рекуррентно вычисляются

$$\mathbf{M}_0 = -\Lambda_{21} \Lambda_{00}^{-1},$$

$$\mathbf{M}_k = -\Lambda_{2,k+1} (\mathbf{M}_{k-1} \Lambda_{1k} + \Lambda_{0k})^{-1}, \quad k = \overline{1, C_1 - 1}.$$

Далее выразим все компоненты π_k , $k = \overline{0, C_1 - 1}$ через π_{C_1}

$$\begin{aligned}\pi_{C_1-1} &= \pi_{C_1} \mathbf{M}_{C_1-1}, \\ \pi_{C_1-2} &= \pi_{C_1-1} \mathbf{M}_{C_1-2} \Rightarrow \pi_{C_1-2} = \pi_{C_1} \mathbf{M}_{C_1-1} \mathbf{M}_{C_1-2}, \\ &\vdots \\ \pi_1 &= \pi_2 \mathbf{M}_1 \Rightarrow \pi_1 = \pi_{C_1} \mathbf{M}_{C_1-1} \mathbf{M}_{C_1-2} \mathbf{M}_{C_1-3} \dots \mathbf{M}_2 \mathbf{M}_1, \\ \pi_0 &= \pi_1 \mathbf{M}_0 \Rightarrow \pi_0 = \pi_{C_1} \mathbf{M}_{C_1-1} \mathbf{M}_{C_1-2} \mathbf{M}_{C_1-3} \dots \mathbf{M}_2 \mathbf{M}_1 \mathbf{M}_0.\end{aligned}$$

Следовательно каждая компонента π_k , $k = \overline{0, C_1-1}$ представима согласно соотношению (1.9)

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

Запишем условие нормировки с учетом разбиения макровектора на компоненты

$$\pi_k$$
$$\sum_{k=0}^{C_1} \pi_k \mathbf{e}^T = 1,$$

где $\mathbf{e}^T$ единичный вектора размерностью $\dim \mathcal{X}_k$.

Следовательно условие нормировки может быть записано в следующем виде:

$$\pi_{C_1} \sum_{k=0}^{C_1} \prod_{j=1}^{C_1-k} \mathbf{M}_{C_1-j} \mathbf{e}^T = 1,$$

где вектор π_{C_1} является единственным решением системы уравнений (1.10).

Лемма доказана. $\square$

1.5. Задача выбора параметра возобновления обслуживания трафика

Перейдем к оценке показателей эффективности широкополосного трафика, к численному анализу [93,96]. В ходе него решается задача по выбору параметра возобновления обслуживания широкополосного трафика. Это необходимо для оценки влияния приоритетного узкополосного трафика на ухудшение качества

обслуживания широкополосного трафика. Для оценки используются два ключевых показателя: вероятность блокировки и прерывания обслуживания широкополосного трафика. Они важны для определения интенсивности поступления новых запросов, и отправки повторных запросов и попыток.

Рассматривается БС пропускной способностью $C = 42$. Сессии широкополосного трафика обслуживаются со скоростью $b = 7$, а узкополосного со скоростью $d = 1$. Размерности орбит равны, $C_1 = C_2 = 9$. Длительность сессий широкополосного и узкополосного трафика составляет 1 минуту и 1 мс соответственно. Запросы начать обслуживание узкополосного трафика приходят в k раз чаще, чем запросы широкополосного, т. е. $\lambda_u = k\lambda_m$.

Численный анализ решает две основные задачи. Во-первых, он помогает оценить, как изменения в интенсивности новых запросов широкополосного и узкополосного трафика, частота повторных заявок и попыток восстановить обслуживание влияют на передачу широкополосного трафика. Во-вторых, он также позволяет определить такие значения интенсивностей, при которых вероятность блокировки широкополосного трафика будет менее заданного порога 4%, а вероятность его прерывания обслуживания— менее 0,04%.

Рассмотрим два сценария. В первом сценарии показатели оценивались с учетом увеличения интенсивности входящих запросов узкополосного трафика. Во втором сценарии показатели оценивались с учетом увеличения интенсивностей повторных заявок и попыток широкополосного трафика. Все исходные данные представлены в Табл. 1.2.

Табл. 1.2 Исходные данные

Параметр	Описание	Значение (Сценарий 1)	Значение (Сценарий 2)
$C = Nb$	Пропускная способность	42	42
b	Скорость передачи широкополосного трафика	7	7
N	Максимальное число	6	6

	обслуживаемых сессий широкополосного трафика		
C_1	Максимальное число задержанных запросов широкополосного трафика	9	9
C_2	Максимальное число повторных попыток широкополосного трафика	9	9
λ_m	Интенсивность входящего потока запросов широкополосного трафика	0.06, 0.08, 0.1 сесс./с	0.08 сесс./с
λ_u	Интенсивность входящего потока запросов узкополосного трафика	$k\lambda_m$ сесс./с	$k\lambda_m$ сесс./с
k	Множитель интенсивности входящих запросов узкополосного трафика	$\overline{0,10^5}$	5 000, 15 000, 25 000
μ_u^{-1}	Средняя длительность сессий узкополосного трафика	60 с.	60 с.
μ_m^{-1}	Средняя длительность сессий широкополосного трафика	1 мс.	1 мс.
γ_1	Интенсивность потока повторных запросов широкополосного трафика начать	10^5 сесс./с	$\overline{0,10^5}$ сесс./с

	обслуживание		
γ_2	Интенсивность потока повторных попыток прерванных сессий широкополосного трафика возобновить обслуживание	10^5 сесс./с	$\overline{0,10^5}$ сесс./с

В первом сценарии рассмотрим три случая с интенсивностями входящих запросов широкополосного трафика $\lambda_m = 0.06, 0.08, 0.1$ сессий/с и входящих запросов узкополосного трафика $\lambda_u = k\lambda_m$ сессий./с, где $k = \overline{0,10^5}$. Интенсивности повторных заявок и попыток фиксированы и равны $\gamma_1 = \gamma_2 = 10^5$ сессий/с.

Результаты расчета интересующих показателей эффективности представлены на Рис. 1.6 – Рис. 1.9. Поскольку основное внимание уделяется вероятностям блокировки и прерывания обслуживания, сосредоточимся на них. На Рис. 1.6 – Рис. 1.9 показаны три области с различным поведением графиков. Например, для вероятности прерывания обслуживания широкополосного трафика (Рис. 1.7) первая область (λ_u от 0 до 10 000) показывает тенденцию к увеличению, вторая область (от 10 000 до 30 000) демонстрирует тенденцию к снижению, а третья область (>30 000) снова демонстрирует тенденцию к увеличению. Сравнив вероятность прерывания обслуживания со средним числом обслуживаемых сессий (Рис. 1.9), можно заметить, что

- при $k = \overline{0,10\ 000}$ число обслуживаемых сессий уменьшается, что приводит к увеличению вероятности прерывания обслуживания. Такое уменьшение числа обслуживаемых сессий связано с их прерыванием;
- при $k = \overline{10\ 000, 30\ 000}$ число обслуживаемых сессий медленно уменьшается, что указывает на меньшее количество прерываний;
- при $k > 30\ 000$ два графика ведут себя аналогично первой области.

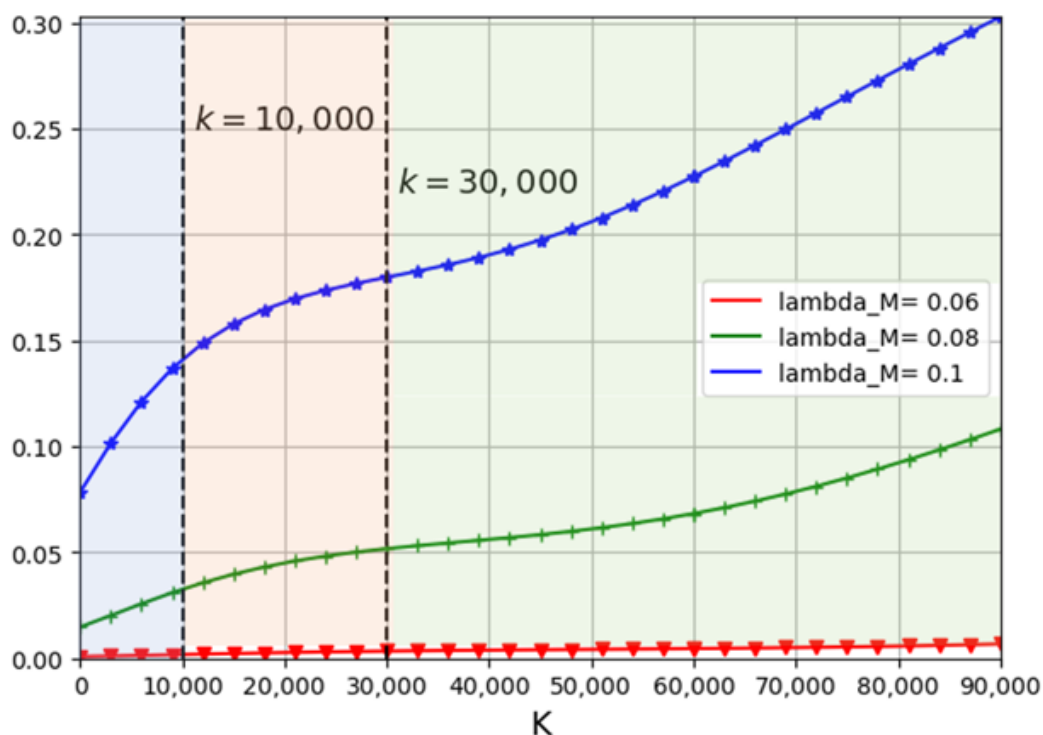


Рис. 1.6 Модель с возобновлением обслуживания, Сценарий 1: Вероятность блокировки широкополосного трафика на долю интенсивности входящего потока узкополосного трафика (k)

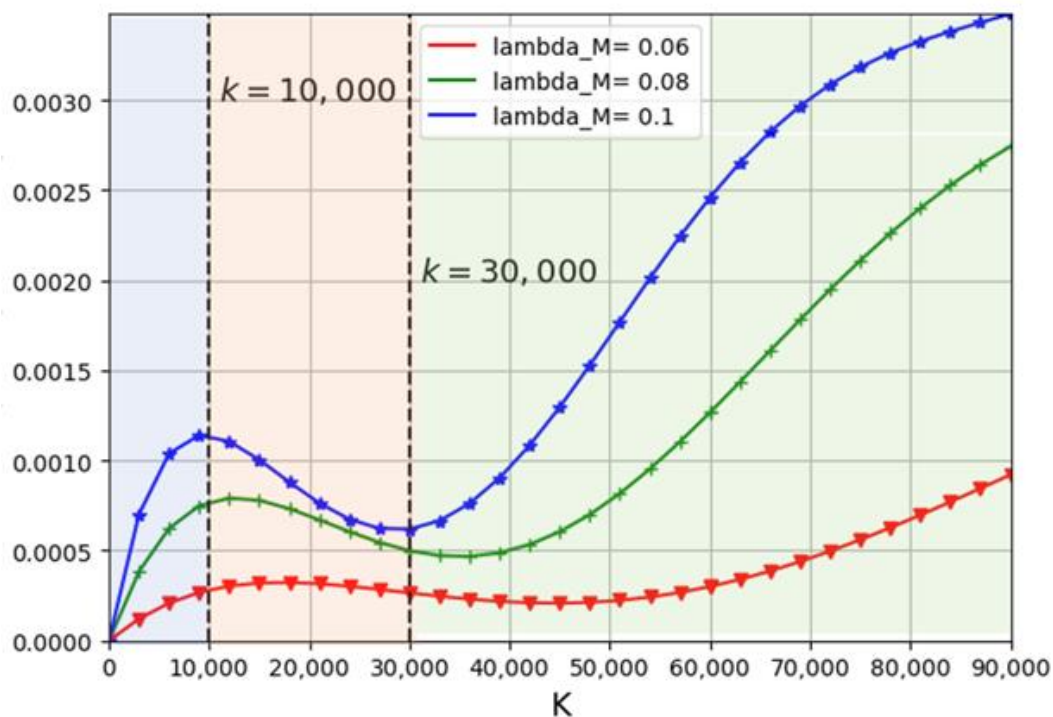


Рис. 1.7 Модель с возобновлением обслуживания, Сценарий 1: Вероятность прерывания обслуживания широкополосного трафика на долю интенсивности входящего потока узкополосного трафика (k)

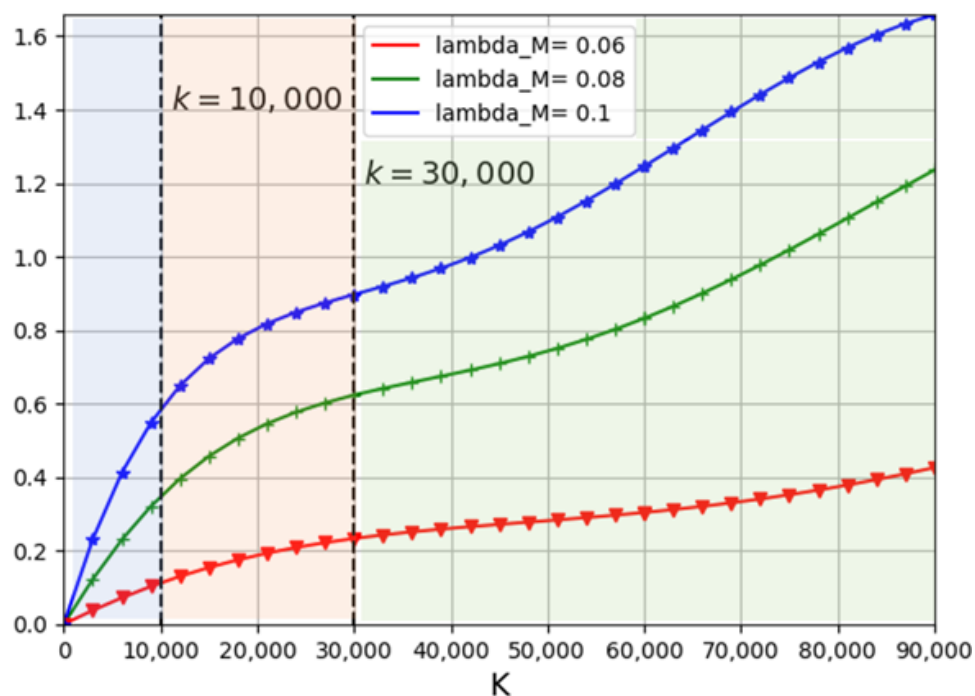


Рис. 1.8 Модель с возобновлением обслуживания, Сценарий 1: Среднее число прерванных сессий широкополосного трафика на долю интенсивности входящего потока узкополосного трафика (k)

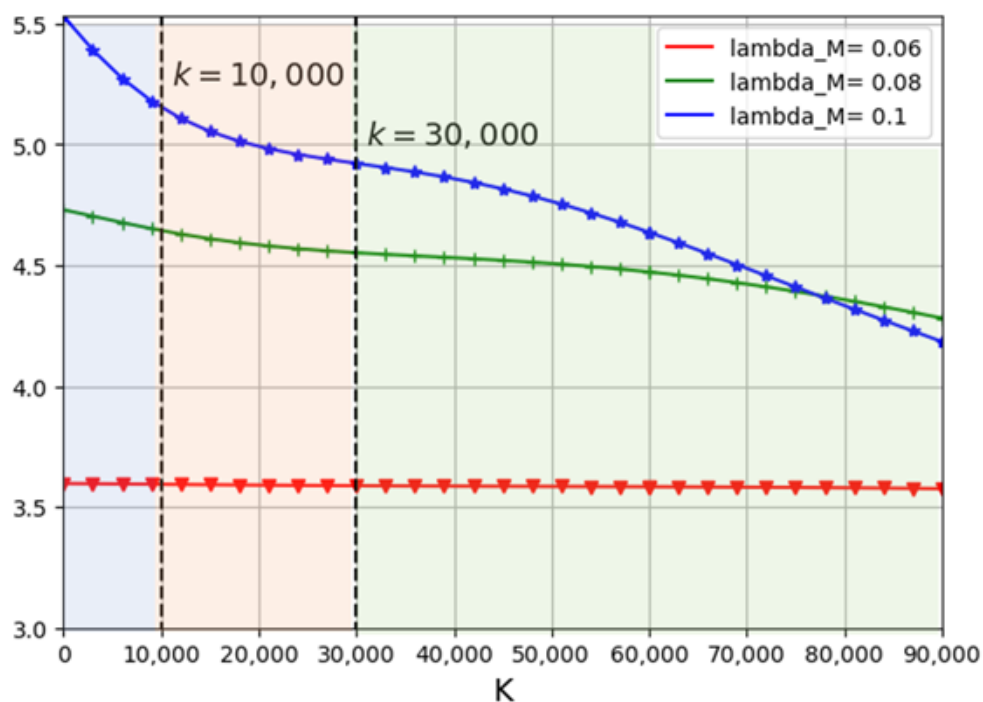


Рис. 1.9 Модель с возобновлением обслуживания, Сценарий 1: Среднее число обслуживаемых сессий широкополосного трафика на долю интенсивности входящего потока узкополосного трафика (k)

Во втором сценарии для трех значений $k = 5\,000, 15\,000, 25\,000$ оценивается зависимость вероятностей блокировки и прерывания обслуживания от интенсивностей повторных заявок и попыток. Предположим, что интенсивность поступления новых запросов широкополосного трафика равна $\lambda_m = 0.08$, а интенсивности повторных заявок и попыток равны $\gamma_1 = \gamma_2 = 10^5$. Из Рис. 1.10 и Рис. 1.11 видно, что графики стабилизируются около $\gamma_1 = \gamma_2 = 10^4$.

Исходя из этого можно сделать вывод: чем чаще повторяются повторные запросы и попытки, тем меньше вероятность блокировки. Таким образом, чем активнее попытки, тем больше сессий будет принято. Однако с ростом числа повторных попыток также возрастает риск прерывания обслуживания.

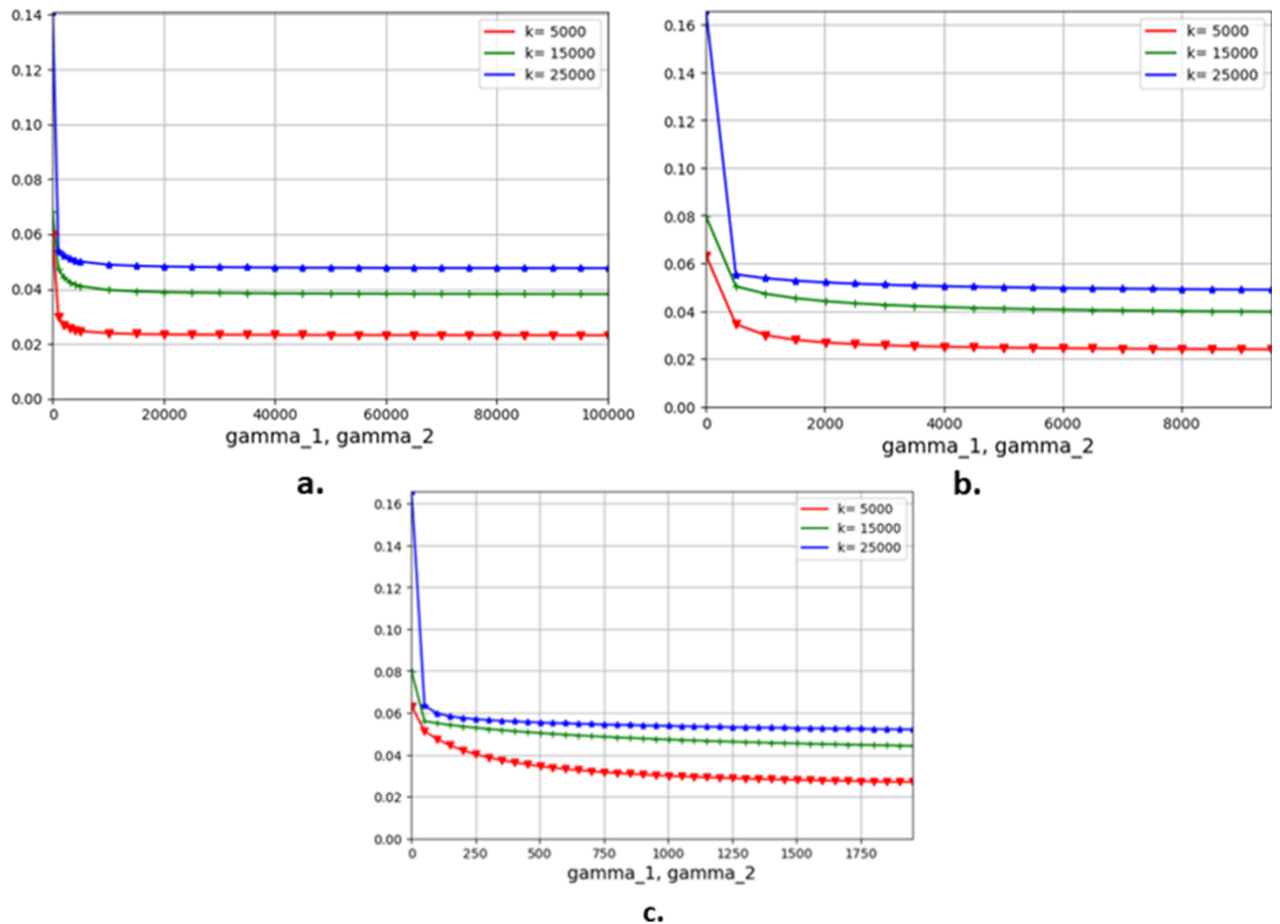


Рис. 1.10 Модель с возобновлением обслуживания, Сценарий 2: Вероятность блокировки широкополосного трафика (а) $\gamma_1 = \gamma_2 \leq 10^5$, (б) $\gamma_1 = \gamma_2 \leq 10^4$, (в) $\gamma_1 = \gamma_2 \leq 2\,000$.

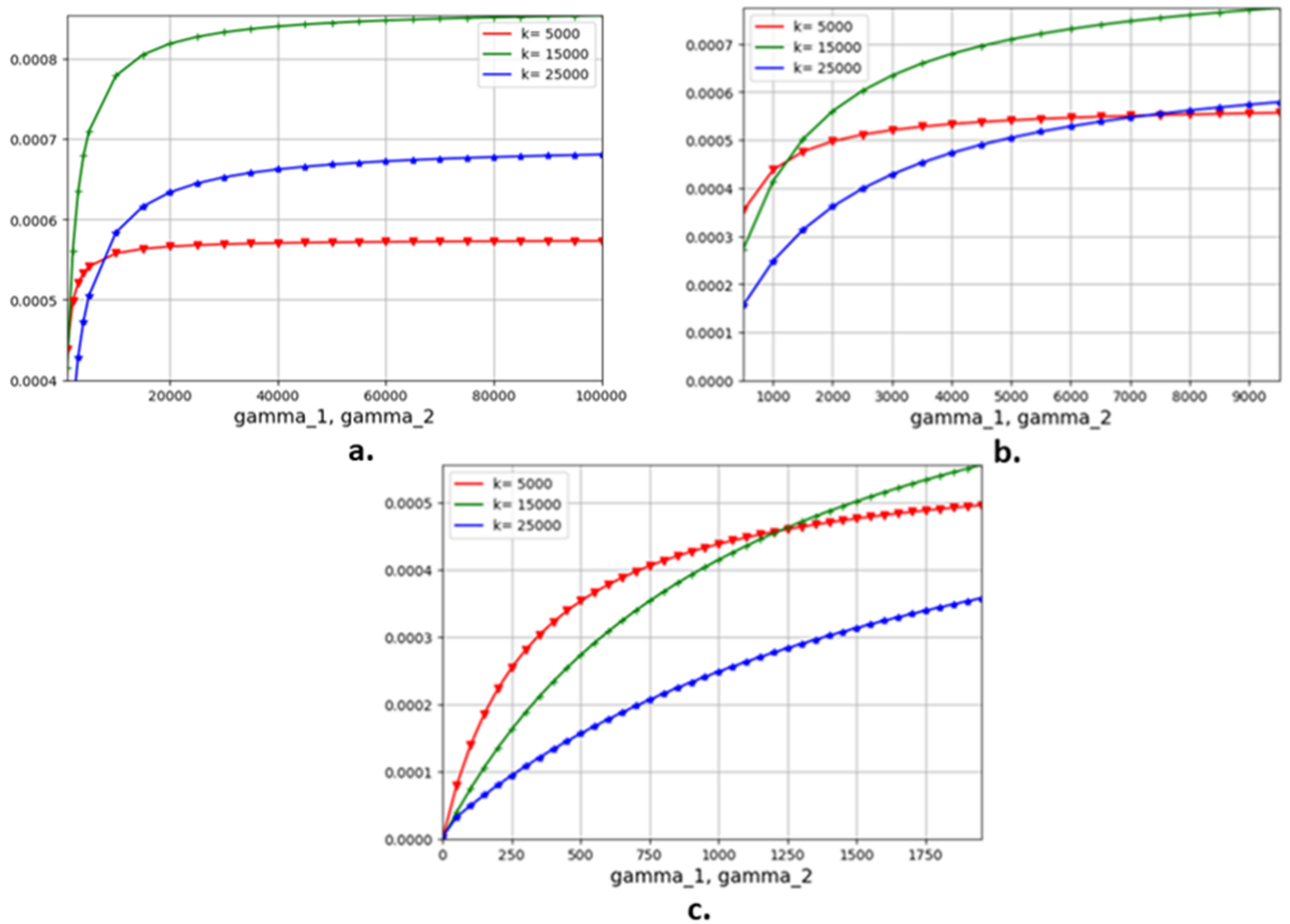


Рис. 1.11 Модель с возобновлением обслуживания, Сценарий 2: Вероятность прерывания обслуживания широкополосного трафика (а) $\gamma_1 = \gamma_2 \leq 10^5$, (б)

$$\gamma_1 = \gamma_2 \leq 10^4, \text{ (в) } \gamma_1 = \gamma_2 \leq 2\,000.$$

Главная задача численного анализа – поиск наилучшего сочетания интенсивностей повторных заявок и попыток, которое соответствует требованиям обслуживания широкополосного трафика. Это значит, что задача – найти такие значения интенсивностей, которые позволят минимизировать вероятность блокировки и прерывания обслуживания, учитывая при этом определённые ограничения. Рассмотрим несколько примеров таких ограничений и соответствующие им значения интенсивности:

1. Когда ограничена только вероятность блокировки запросов, например, меньше 0,04 как показано на Рис. 1.10, γ_1 и γ_2 могут варьироваться от 250 до бесконечности. Однако запросы узкополосного трафика должны поступать не более чем в 5 000 раз быстрее чем запросы широкополосного трафика (т. е. $k \leq 5\,000$).
2. Когда ограничена только вероятность прерывания обслуживания, например, менее $2 \cdot 10^{-4}$, согласно Рис. 1.11 (с), подходящие значения могут быть : (i) γ_1 и γ_2 от 0 до 150 с $k \geq 5\,000$; (ii) γ_1 и γ_2 от 0 до 300 с $k \geq 15\,000$; (iii) γ_1 и γ_2 от 0 до 750 с $k \geq 25\,000$.
3. Когда ограничены как вероятность блокировки, так и вероятность прерывания обслуживания, возникают следующие случаи: если вероятность блокировки должна быть меньше 0,03, а вероятность прерывания обслуживания меньше $3 \cdot 10^{-4}$ не существует значений, удовлетворяющих этим ограничениям. Если вероятность блокировки должна быть меньше 0,04, а вероятность прерывания обслуживания меньше $4 \cdot 10^{-4}$, γ_1 и γ_2 должны находиться в диапазоне от 250 до 750, когда $k \leq 5\,000$.

В рамках численного анализа разработанной модели рассмотрены различные схемы доступа, варьируя размер орбит в системе относительно широкополосного трафика: (i) без возобновления обслуживания т. е. с явными блокировками ($C_1 = C_2 = 0$), (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 проанализированы следующие показатели: среднее число обслуживаемых сессий и вероятность прерывания обслуживания широкополосного трафика. Результаты показаны на Рис. 1.12 и Рис. 1.13. При рассмотрении второй схемы доступа, с возобновлением обслуживания прерванных сессий ($C_1 = 0, C_2 = 9$), вероятность прерывания

обслуживания оказывается наименьшей, однако среднее число обслуживаемых сессий также оказывается наименьшим среди всех схем доступа. Аналогичная ситуация наблюдается и для первой схемы без возобновления обслуживания ($C_1 = C_2 = 0$). Для третьей схемы, предложенной модели в данном разделе, даже несмотря на то, что вероятность прерываний самая высокая, она позволяет обслуживать большее число сессий широкополосного трафика, сохраняя при этом вероятность прерывания обслуживания ниже $1 \cdot 10^{-3}$. Исходя из этого, предложенная модель является наиболее выгодной стратегией среди рассмотренных.

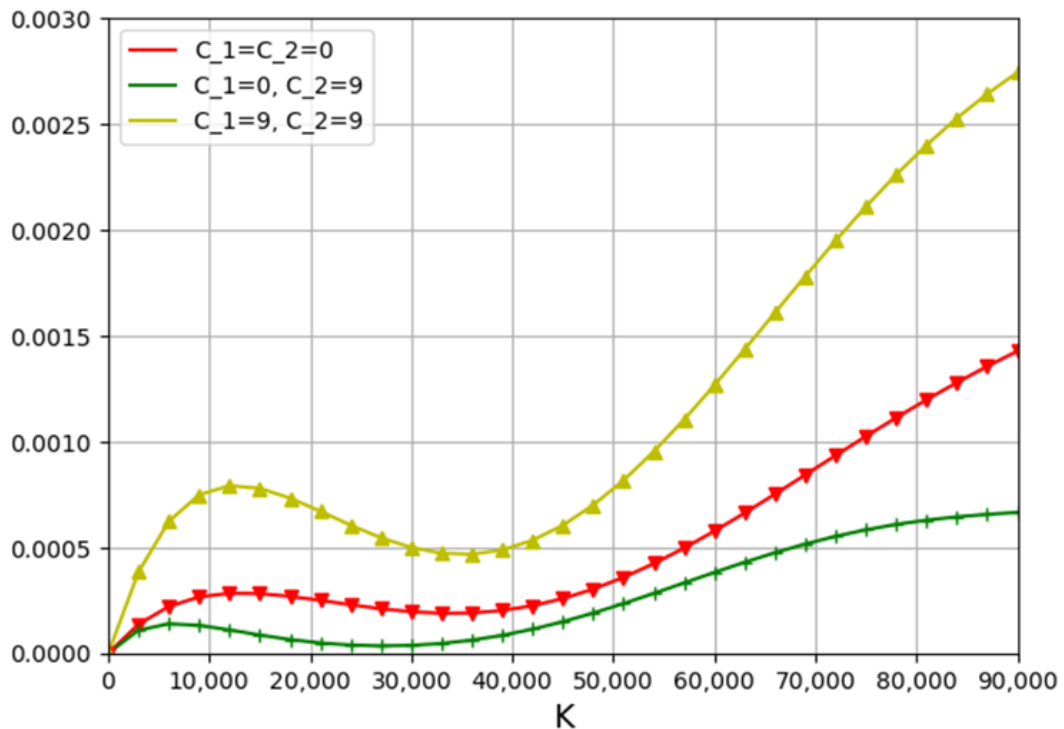


Рис. 1.12 Вероятность прерывания обслуживания широкополосного трафика для схем доступа: 1. без возобновления обслуживания ($C_1 = C_2 = 0$), 2. с возобновлением обслуживания прерванных сессий ($C_1 = 0, C_2 = 9$), 3. с возобновлением обслуживания ($C_1 = C_2$)

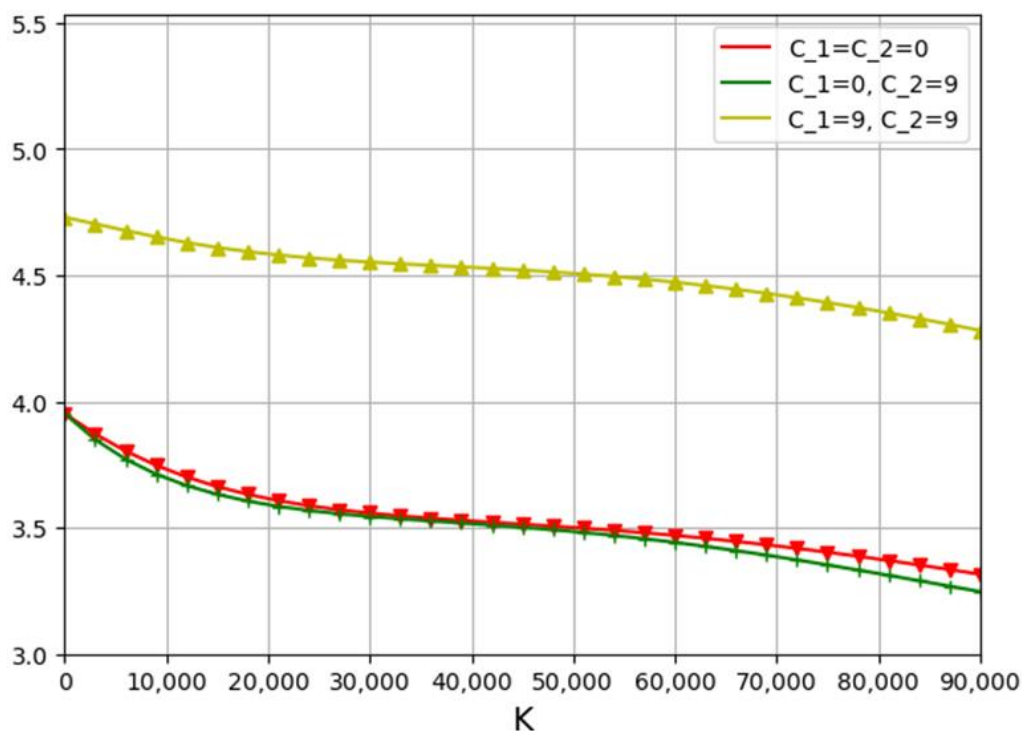


Рис. 1.13 Среднее число обслуживаемых сессий широкополосного трафика для разных схем доступа: 1. без возобновления обслуживания ($C_1 = C_2 = 0$), 2. с возобновлением обслуживания прерванных сессий ($C_1 = 0, C_2 = 9$), 3. с возобновлением обслуживания ($C_1 = C_2$)

1.6. Постановка задачи исследования

Исследования, описанные в разделах 1.3–1.5 диссертации, посвящены схеме доступа приоритетной передачи широкополосного и узкополосного трафика, которая позволяет передавать широкополосный трафик с задержкой и прерываниями обслуживания, а также отправлять повторные запросы начать обслуживание и предпринимать попытки возобновить передачу. На Рис. 1.14 под номером 1 представлена данная схема. Кроме этой схемы доступа, в диссертационной работе разработаны ещё две: схема с прерыванием обслуживания широкополосного трафика (Рис. 1.14, номер 2) и схема со снижением скорости передачи широкополосного трафика (Рис. 1.14, номер 3). Это

связано с тем, что в зависимости от сценария использования могут возникать разные требования. Например, при видеонаблюдении в сценарии использования «умный город» при загруженном канале невозможны прерывания обслуживания и задержки, но можно снизить скорость передачи. А при передаче данных между пользователями таких ограничений может не быть.

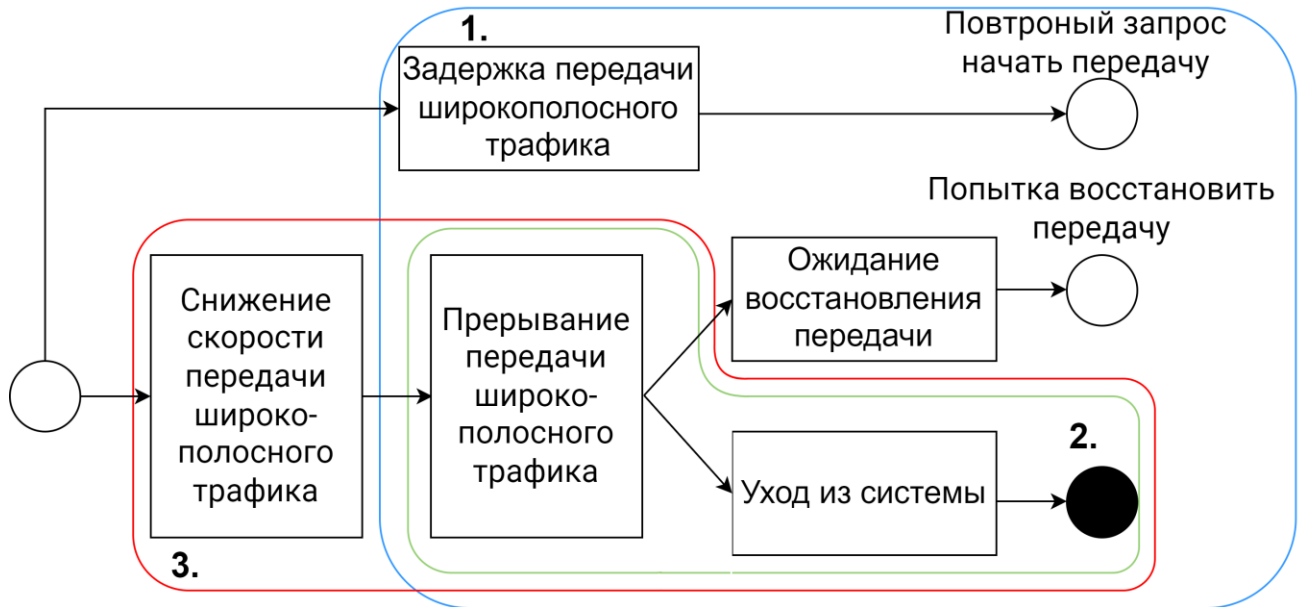


Рис. 1.14 Исследуемые в диссертации схемы доступа широкополосного трафика [92]

При планировании передачи необходимо учитывать специфику беспроводной сети: при удалении ПУ от БС выделяются разные частотно-временные ресурсы. Модель ресурса представляется в виде трёхмерной структуры и описывается требованием к ресурсу: $\mathbf{y} = (y_f, y_t, y_p)$, $y_f \in [0, F]$, $y_t \in [0, 1]$, $y_p \in [0, P]$, где $T=1$ нормированная длина кадра, P максимальная мощность передаваемого сигнала. Множество вариантов занятия ресурса для u сессий в случае деления ресурса по частоте и времени имеет вид

$$\mathcal{Y}(u) = \left\{ (y_1, \dots, y_u) : 0 < y_f^j \leq F, 0 < y_t^j \leq 1, 0 < y_p^j \leq P, \sum_{j=1}^u y_f^j \leq F, \sum_{j=1}^u y_t^j \leq 1, y_p^j \leq P, j = \overline{1, u} \right\}, \quad u > 0,$$

а множество всех вариантов занятия ресурсов имеет вид

$$\mathcal{Y} = \{(0,0,0)\} \cup \bigcup_{u=1}^{\infty} \mathcal{Y}(u).$$

Под моделью требования к ресурсу будем понимать следующую систему уравнений, которая задает тройку параметров $(y_f, y_t, y_p) \in \mathcal{Y}$:

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

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

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

При передаче сигнала могут возникать препятствия, которые мешают распространению сигнала. В зависимости от того, насколько сильно перекрыта зона распространения сигнала, можно говорить о прямой (англ. Line of Sight - LOS) или непрямой видимости (англ. Non Line of Sight - NLOS). Состояние LOS означает, что между ПУ и БС нет препятствий, иначе состояние NLOS.

Поскольку ПУ находятся на разных расстояниях от БС, мощность затухания сигнала будет случайной. В стандарте 3GPP TR 38.901 представлены эмпирические модели мощностей затухания сигнала PL для основных сценариев развертывания сети 5G: макросота в городе (англ. urban macro, UMa), микросота в городе (англ. urban micro, UMi), макросота в сельской местности (англ. rural macro, RMa), точка доступа внутри помещения (англ. indoor hotspot, InH) и крытая фабрика (англ. indoor factory, InF) [21]. Однако для построения моделей стохастической геометрии обычно используются упрощённые виды формул, не учитывающие кусочно-заданный вид функции для прямой видимости и максимум нескольких величин мощностей PL для непрямой видимости [18].

В диссертационной работе на основе таких моделей выводятся ФР мощности затухания сигнала, учитывая случайное положение пользователей в соответствии со сценариями, описанными в 3GPP TR 38.901. Данная ФР

используется для расчёта принимаемой мощности сигнала и условных вероятностей принятия новых сессий начать обслуживание. Закон распределения пользователей в соте взят произвольный.

Рассмотреть совместное занятие радиоресурса и случайный характер поведения пользователей позволяет модель на основе аппарата ресурсных систем массового обслуживания. Таким образом, целью работы является разработка 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 поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. 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.
2. Разработка алгоритмов для анализа и расчета показателей эффективности обслуживания широкополосного трафика при приоритетном доступе узкополосного трафика в беспроводной сети при, анализ влияния на показатели моделей мощности затухания сигнала.

В

Табл. 1.3 отражена последовательность изложения материала в диссертационной работе в соответствии с поставленными задачами. Каждая модель совместного обслуживания широкополосного и узкополосного трафика представлена в виде систем массового обслуживания с различными схемами доступа и алгоритмами занятия ресурса. Различные методы анализа и алгоритмы позволяют оценить качество передачи широкополосного трафика в предложенных схемах доступа, которые отражены в моделях в виде показателей эффективности.

Табл. 1.3. Структура диссертационной работы

	Особенности моделей (задача 1)	Методы анализа (задача 2)
Результат 1	Модель СМО с двумя орбитами для двух классов потокового трафика с возобновлением обслуживания широкополосного трафика (глава 1, разделы 1.3-1.5).	Матричный рекуррентный алгоритм расчета стационарного распределения вероятностей (глава 1 – раздел 1.4); Отличие схемы доступа отражено в численном анализе при расчете показателей эффективности (глава 1 – раздел 1.5).
Результат 2	Модель РеСМО для двух классов потокового трафика с прерыванием обслуживания широкополосного трафика и с зависимым занятием двух типов ресурса согласно циклическому алгоритму распределения (глава 2, разделы 2.3-2.5).	Моделирование мощности затухания сигнала согласно кусочно-заданному виду функции для прямой видимости и максимуму нескольких функций для не прямой видимости (глава 2 – разделы 2.1-2.2); Принципы распределения ресурса между сессиями отражены в условных вероятностях принятия новых сессий к обслуживанию (глава 2 – раздел 2.3); Матричный рекуррентный алгоритм расчета стационарного распределения (глава 2 – раздел 2.4); Алгоритм снижения размерности системы уравнений равновесия (глава 2 – раздел 2.5).

Результат 3	Модель РеСМО для двух классов потокового трафика со снижением скорости передачи широкополосного трафика и с зависимым занятием двух типов ресурса согласно взвешенному циклическому алгоритму распределения (глава 3).	Принципы распределения ресурсов между сессиями отражены в условных вероятностях принятия новых сессий к обслуживанию (глава 3 – разделы 3.2-3.3); Принципы снижения скорости передачи отражены в рассчитываемых показателях эффективности передачи широкополосного трафика и решении задачи максимизации средней скорости (глава 3 – разделы 3.4-3.5).
-------------	---	--

ГЛАВА 2 МОДЕЛЬ С ПРЕРЫВАНИЕМ ОБСЛУЖИВАНИЯ ШИРОКОПОЛОСНОГО ТРАФИКА

2.1. Модель затухания мощности сигнала и занятия ресурса

В главе 2 получен результат №2, а также представлены основы для получения результата №3. Главной целью данной главы является построение ресурсной системы массового обслуживания с приоритетным доступом узкополосного трафика и прерыванием обслуживания широкополосного трафика. Для включения в модель зависимого занятия ресурса со снижением мощности передачи сессий представлена модель мощности затухания сигнала с кусочно-заданной функцией для прямой видимости и максимумом нескольких функций для не прямой видимости. В отличие от модели, исследованной в разделе 1.3, текущая модель включает зависимое занятие ресурсов с учетом циклического алгоритма (англ. Round Robbin - RR) распределения ресурса. Согласно этому алгоритму, временной интервал делится поровну между всеми сессиями, частота остаётся постоянной, а мощность изменяется только для сессий широкополосного трафика, оставаясь постоянной для сессий узкополосного трафика.

Перейдем к построению модели мощности затухания сигнала PL и рассмотрим соту с одной БС по центру, которая использует несущую частоту f_c и создает покрытие радиуса R . Передающая антенна БС расположена на высоте h_{BS} . Пользователи случайным образом возникают в данной соте с ПУ на высоте h_{UT} . Проекция расстояния от ПУ до БС равна d . А расстояние от ПУ до БС в трехмерном пространстве составляет $D(d) = \sqrt{d^2 + |h_{BS} - h_{UT}|^2}$ (Рис. 2.1).

Если расстояние между ними в двумерном пространстве равно d , то вероятность нахождения в прямой видимости можно описать следующей кусочно-заданной функцией

$$\Pr_{\text{LOS}}(d) = \begin{cases} \Pr_1^{\text{LOS}}(d), & 0 = r_0 \leq d < r_1, \\ \Pr_2^{\text{LOS}}(d), & r_1 \leq d < r_2, \\ \dots & \dots \\ \Pr_I^{\text{LOS}}(d), & r_{I-1} \leq d \leq r_I = R, \end{cases} \quad (2.1)$$

где r_i радиус, определяющий границы i -ого интервала для расчета вероятности LOS $\Pr_i^{\text{LOS}}(d)$, $i = \overline{1, I}$.

Мощность $\text{PL}(d)$ затухания сигнала зависит от $D(d)$ и имеет вид для общего случая LOS и NLOS согласно следующему соотношению:

$$\text{PL}(d) = \text{PL}_{\text{LOS}}(d) \Pr_{\text{LOS}}(d) + \text{PL}_{\text{NLOS}}(d) (1 - \Pr_{\text{LOS}}(d)). \quad (2.2)$$

Для случаев LOS и NLOS каждая компонента из функций мощности затухания сигнала в общем виде имеет схожее представление:

$$\begin{aligned} \text{PL}_m^l(d) [\text{dB}] &= \alpha_m^l [\text{dB}] + \beta_m^l \log_{10} D(d), \\ l = \text{"LOS"}, m = j = \overline{1, J}, \quad l = \text{"NLOS"}, m = k = \overline{0, K}, \end{aligned} \quad (2.3)$$

где α_m^l, β_m^l коэффициенты модели мощности затухания сигнала в условиях прямой и не прямой видимостях соответственно, для основных сценариев развертывания беспроводных сетей согласно стандарту 3GPP TR 38.901 [21].

В случае LOS мощность затухания сигнала представляет собой кусочно-заданную функцию:

$$\text{PL}_{\text{LOS}}(d) = \begin{cases} \text{PL}_1^{\text{LOS}}(d), & 0 = d_0 \leq d < d_1, \\ \text{PL}_2^{\text{LOS}}(d), & d_1 \leq d < d_2, \\ \dots & \dots \\ \text{PL}_J^{\text{LOS}}(d), & d_{J-1} \leq d \leq d_J = R, \end{cases} \quad (2.4)$$

где $d_j, j = \overline{1, J}$ границы интервалов контрольных точек (англ. break point distance).

В случае NLOS мощность затухания сигнала представляет собой функцию максимума:

$$PL_{NLOS}(d) = \max\left(PL_{LOS}(d), PL_1^{NLOS}(d), \dots, PL_K^{NLOS}(d)\right). \quad (2.5)$$

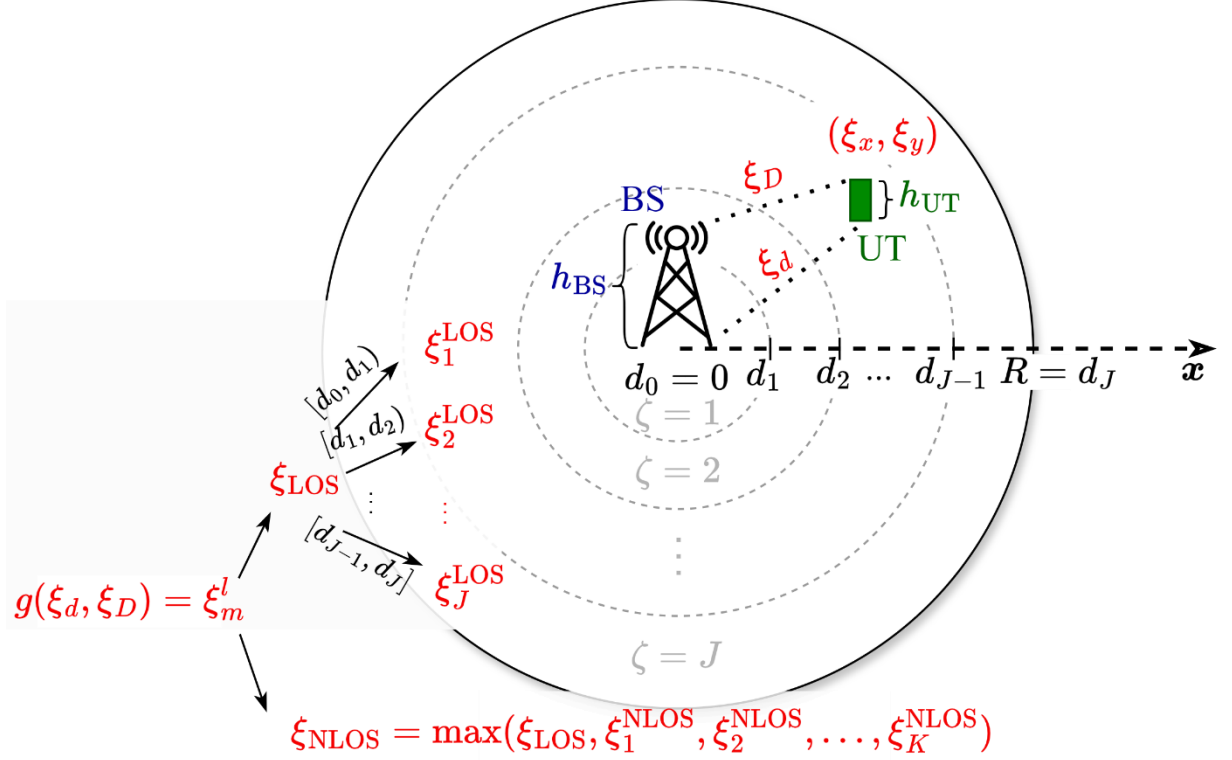


Рис. 2.1 Схема соты беспроводной сети с учетом случайного расположения пользователей

2.2. Функция распределения мощности затухания сигнала

Перейдем к построению стохастической модели мощности затухания сигнала [97, 98]. Схема соты с учетом случайного расположения пользователей показана на Рис. 2.1. Так как пользователь может находиться в любой точке соты радиуса действия БС, примем расстояние между ПУ и БС как случайную величину (СВ) ξ_d с функцией распределения (ФР) $F_{\xi_d}(x) = \Pr(\xi_d \leq x)$, описывающую расстояние между БС и ПУ в двухмерном пространстве. Тогда

расстояние от БС и ПУ в трехмерном пространстве ξ_D также описывается функцией от СВ ξ_d с ФР вида

$$\begin{aligned} F_{\xi_D}(x) &= \Pr(\xi_D \leq x) = \Pr\left(\sqrt{\xi_d^2 + (h_{BS} - h_{UT})^2} \leq x\right) = \\ &= \Pr\left(\xi_d \leq \sqrt{x^2 - (h_{BS} - h_{UT})^2}\right) = F_{\xi_d}\left(\sqrt{x^2 - (h_{BS} - h_{UT})^2}\right). \end{aligned}$$

Утверждение 2.1. Функции распределения мощности затухания сигнала в условиях прямой или непрямой видимостях вычисляются согласно формулам

$$F_{\xi_{LOS}}(x) = \sum_{j=1}^J F_{\xi_j^{LOS}}(x) [F_{\xi_d}(d_j) - F_{\xi_d}(d_{j-1})], \quad (2.6)$$

$$F_{\xi_{NLOS}}(x) = F_{\xi_{LOS}}(x) \prod_{k=1}^K F_{\xi_k^{NLOS}}(x), \quad (2.7)$$

где компонента ξ_m^l имеет вид:

$$F_{\xi_m^l}(x) = \Pr(\xi_m^l \leq x) = F_{\xi_d}\left(\sqrt{\left(\frac{x}{\alpha_m^l}\right)^{2/\beta_m^l} - (h_{BS} - h_{UT})^2}\right), \quad (2.8)$$

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

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

Доказательство. Согласно формуле (2.4) ФР СВ ξ_{LOS} будет иметь вид:

$$\begin{aligned} F_{\xi_{LOS}}(x) &= \Pr(\xi_{LOS} \leq x) = \\ &= \sum_{j=1}^J \Pr(\xi_{LOS} \leq x | d_{j-1} \leq \xi_d < d_j) \Pr(d_{j-1} \leq \xi_d < d_j) \\ &= \sum_{j=1}^J F_{\xi_j^{LOS}}(x) [F_{\xi_d}(d_j) - F_{\xi_d}(d_{j-1})]. \end{aligned}$$

А для ФР СВ ξ_{NLOS} согласно формуле (2.5) примет вид:

$$\begin{aligned} F_{\xi_{\text{NLOS}}}(x) &= \Pr(\xi_{\text{NLOS}} \leq x) = \\ &= \Pr\left(\max\left(\xi_{\text{LOS}}, \xi_1^{\text{NLOS}}, \dots, \xi_K^{\text{NLOS}}\right) \leq x\right) = \\ &= \Pr\left(\xi_{\text{LOS}} \leq x, \xi_1^{\text{NLOS}} \leq x, \dots, \xi_K^{\text{NLOS}} \leq x\right) = \\ &= \Pr(\xi_{\text{LOS}} \leq x) \prod_{k=1}^K \Pr(\xi_k^{\text{NLOS}} \leq x) = F_{\xi_{\text{LOS}}}(x) \prod_{k=1}^K F_{\xi_k^{\text{NLOS}}}(x). \end{aligned}$$

Далее компонента модели затухания сигнала ξ_m^l также представляется как функция от СВ ξ_D с ФР согласно формуле (2.3) следующим образом

$$\begin{aligned} F_{\xi_m^l}(x) &= \Pr(\xi_m^l \leq x) = \Pr\left(\alpha_m^l(\xi_D)^{\beta_m^l} \leq x\right) = \Pr\left(\xi_D \leq \left(\frac{x}{\alpha_m^l}\right)^{\frac{1}{\beta_m^l}}\right) = \\ &= F_{\xi_D}\left(\left(\frac{x}{\alpha_m^l}\right)^{\frac{1}{\beta_m^l}}\right) = F_{\xi_d}\left(\sqrt{\left(\frac{x}{\alpha_m^l}\right)^{\frac{2}{\beta_m^l}} - (h_{\text{BS}} - h_{\text{UT}})^2}\right), \end{aligned}$$

$$l = \text{"LOS"}, m = j = \overline{0, J}, \quad l = \text{"NLOS"}, m = k = \overline{0, K}.$$

Утверждение доказано. □

Лемма 2.1. Функция распределения мощности затухания сигнала приближенно вычисляется как свертка

$$\begin{aligned} F_{\xi_{\text{PL}}}(x) &\approx \Pr\left(\xi_{\text{LOS}} E[\xi_{\text{PrLOS}}] + \xi_{\text{NLOS}} [1 - E[\xi_{\text{PrLOS}}]] \leq x\right) \approx \\ &\approx \int_0^\infty F_{\xi_{\text{LOS}}}\left(\frac{x}{E[\xi_{\text{PrLOS}}]} - y\right) dF_{\xi_{\text{NLOS}}}\left(\frac{y}{1 - E[\xi_{\text{PrLOS}}]}\right), \end{aligned} \quad (2.9)$$

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

Доказательство.

ФР СВ ξ_{PL} затухания сигнала согласно формуле (2.2) записывается в виде

$$F_{\xi_{\text{PL}}}(x) = \Pr(\xi_{\text{PL}} \leq x) = \Pr\left(\xi_{\text{LOS}} \xi_{\text{PrLOS}} + \xi_{\text{NLOS}} [1 - \xi_{\text{PrLOS}}] \leq x\right),$$

где ξ_{PrLOS} СВ вероятности расположения ПУ в зоне прямой видимости.

Примем следующие упрощающие предположения: значения СВ $\xi_{\text{Pr}_{\text{LOS}}} = \mathbb{E}[\xi_{\text{Pr}_{\text{LOS}}}]$, СВ ξ_{LOS} и ξ_{NLOS} не зависят друг от друга. Тогда искомая ФР $F_{\xi_{\text{PL}}}(x) \approx \Pr(\xi_{\text{LOS}}\mathbb{E}[\xi_{\text{Pr}_{\text{LOS}}}] + \xi_{\text{NLOS}}[1 - \mathbb{E}[\xi_{\text{Pr}_{\text{LOS}}}] \leq x)$ будет представлять собой свертку.

Лемма доказана. $\square$

Согласно формуле Шеннона и уравнению Фрииса принимаемая мощность сигнала для алгоритма RR может быть определена следующим образом

$$y_p(y_f, y_t) = \text{PL} \frac{I_0 + N_0}{G_t G_r} \left(2^{\frac{Cu}{F}} - 1 \right).$$

Так как каждой сессии выделяется случайная мощность передачи, мощность может быть выражена как функция от СВ модели затухания сигнала

$$\xi_p = g_p(\xi_{\text{PL}}) = \xi_{\text{PL}} \frac{I_0 + N_0}{G_t G_r} \left(2^{Cu/F} - 1 \right) \text{ с ФР вида}$$

$$F_{\xi_p}(x) = \Pr(\xi_p \leq x) = \Pr\left(\xi_{\text{PL}} \frac{I_0 + N_0}{G_t G_r} \left(2^{\frac{Cu}{F}} - 1 \right) \leq x\right) = F_{\xi_{\text{PL}}}\left(\frac{G_t G_r}{I_0 + N_0} \left(2^{\frac{Cu}{F}} - 1 \right)^{-1} x\right).$$

Следствие 2.1. Если пользователи распределены равномерно в области действия БС радиусом R , т.е. СВ $\xi_d \sim \text{Unit}(0, R)$ и ФР $F_{\xi_d}(x) = x^2 / R^2$, $x \in [0, R]$, тогда для СВ ξ_D ФР $F_{\xi_D}(x)$ будет представима в виде

$$F_{\xi_D}(x) = \Pr(\xi_D \leq x) = \begin{cases} 0, & x < 0, \\ \frac{x^2 - |h_{\text{BS}} - h_{\text{UT}}|^2}{R^2}, & x \in [|h_{\text{BS}} - h_{\text{UT}}|, \sqrt{R^2 + |h_{\text{BS}} - h_{\text{UT}}|^2}], \\ 1, & x > \sqrt{R^2 + |h_{\text{BS}} - h_{\text{UT}}|^2}, \end{cases}$$

а ФР СВ ξ_{LOS} и ξ_{NLOS} будут определены как

$$F_{\xi_{\text{LOS}}}(x) = \sum_{j=1}^J \frac{\left(\frac{x}{\alpha_j^{\text{LOS}}}\right)^{\frac{2}{\beta_j^{\text{LOS}}}} - (h_{\text{BS}} - h_{\text{UT}})^2}{R^2} \left[\frac{d_j^2 - d_{j-1}^2}{R^2} \right],$$

$$F_{\xi_{\text{NLOS}}}(x) = F_{\xi_{\text{LOS}}}(x) \prod_{k=1}^K \frac{\left(\frac{x}{\alpha_k^{\text{LOS}}}\right)^{\frac{2}{\beta_k^{\text{LOS}}}} - (h_{\text{BS}} - h_{\text{UT}})^2}{R^2}.$$

При построении моделей ресурсных систем исследователи обычно применяют упрощённые формулы. В рамках численного анализа, было осуществлено сравнение графиков функции распределения мощности затухания сигнала для сценариев макросоты UMa и микросоты UMi в городской среде со следующим набором исходных данных: радиус действия БС $R = 5000\text{м}$, центральная частота $f_c = 6\text{ГГц}$, высота ПУ $h_{\text{UT}} = 1.5\text{м}$, высоты БС для UMa $h_{\text{BS}} = 25\text{м}$ и для UMi $h_{\text{BS}} = 10\text{м}$. Предположим, что пользователи распределены равномерно в области действия БС.

Расчёты производились с использованием как предложенных формул, так и упрощённых формул, указанных в спецификации 3GPP, которые могут быть представлены как

$$F_{\xi_{\text{LOS}}}^{i}(x) = F_{\xi_1^{i,\text{LOS}}}(x) = F_{\xi_{\text{NLOS}}}^{i}(x) = F_{\xi_d} \left(\sqrt{\left(\frac{x}{\alpha_{\text{opt}}^i}\right)^{\frac{2}{\beta_{\text{opt}}^i}} - (h_{\text{BS}} + h_{\text{UT}})^2} \right),$$

$i = \text{UMa}, \text{UMi},$

где коэффициенты модели затухания $\alpha_{\text{opt}}^{\text{UMa,UMi}} = 32.4 + 20\log_{10} f_c,$

$$\beta_{\text{opt}}^{\text{UMa}} = 30, \beta_{\text{opt}}^{\text{UMi}} = 31.9.$$

Результаты сравнения графиков показаны на Рис. 2.2 и Рис. 2.3 [98]. График функции распределения, построенный на основе упрощённых формул $F_i^{\text{Opt}}(x), i = \text{LOS}, \text{NLOS},$ располагается выше, что служит верхней оценкой.

Однако применение этих упрощённых формул в дальнейшем может привести к

занижению пропускной способности и количества пользователей, которые могут быть обслужены в соте.

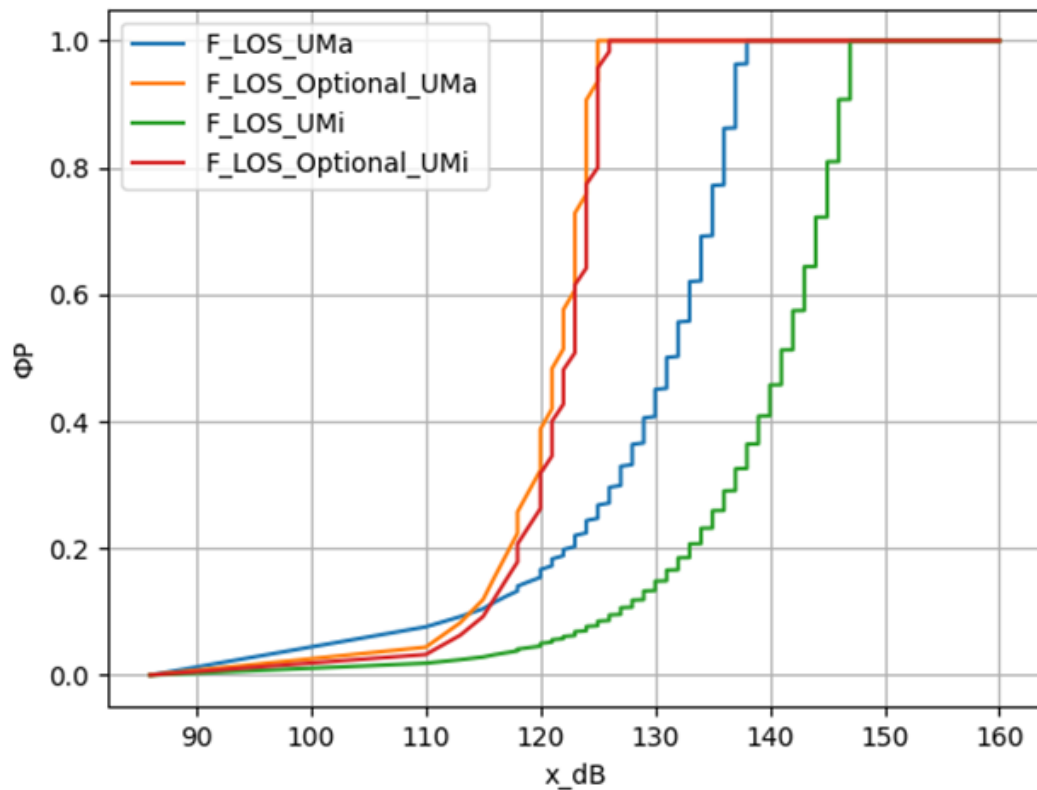


Рис. 2.2 График функции распределения мощности затухания сигнала для LOS

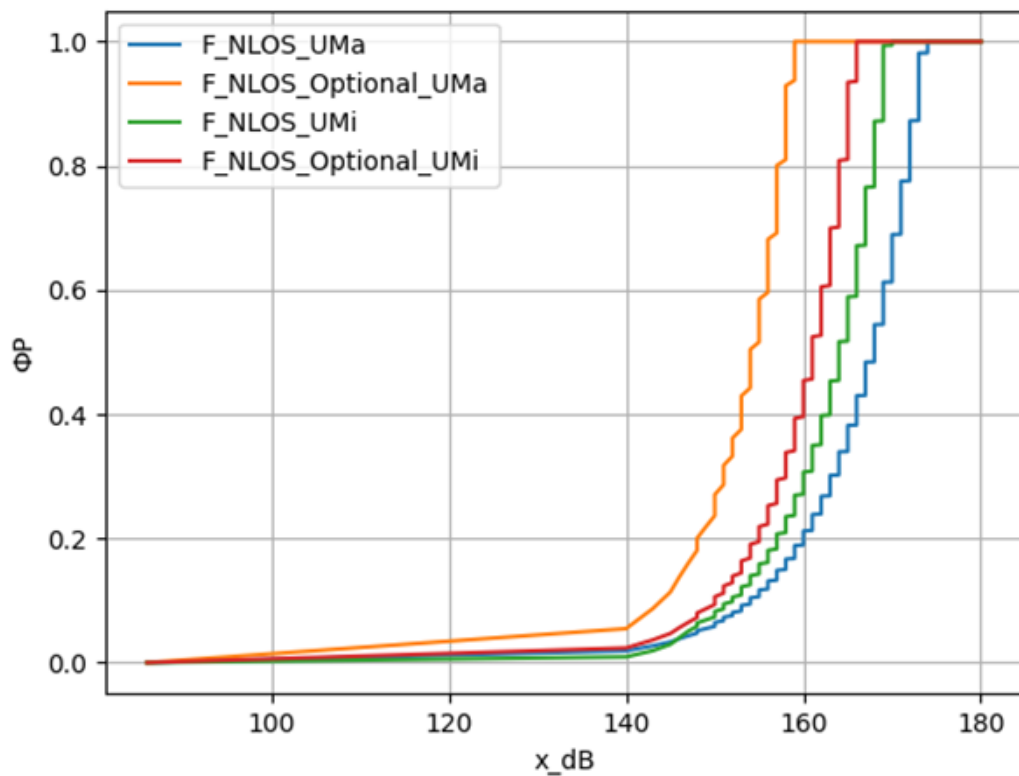


Рис. 2.3 График функции распределения мощности затухания сигнала для NLOS

2.3. Ресурсная система массового обслуживания с прерыванием

Перейдем к построению модели с прерыванием обслуживания широкополосного трафика [99]. Рассмотрим соту с БС, как и в разделе 1.3, однако в данной системе БС не имеет буферов. Входящие потоки широкополосного и узкополосного трафика, их обслуживание имеют аналогичны модели с двумя орбитами из раздела 1.3.

Приоритет узкополосного трафика реализуется следующим образом: если канал занят и поступает новый запрос узкополосного трафика начать обслуживание, то, если в это время уже обслуживается сессия широкополосного трафика, она будет прервана, а новый запрос будет принят. Схема приоритетной передачи с прерыванием обслуживания широкополосного трафика показана на Рис. 2.4.

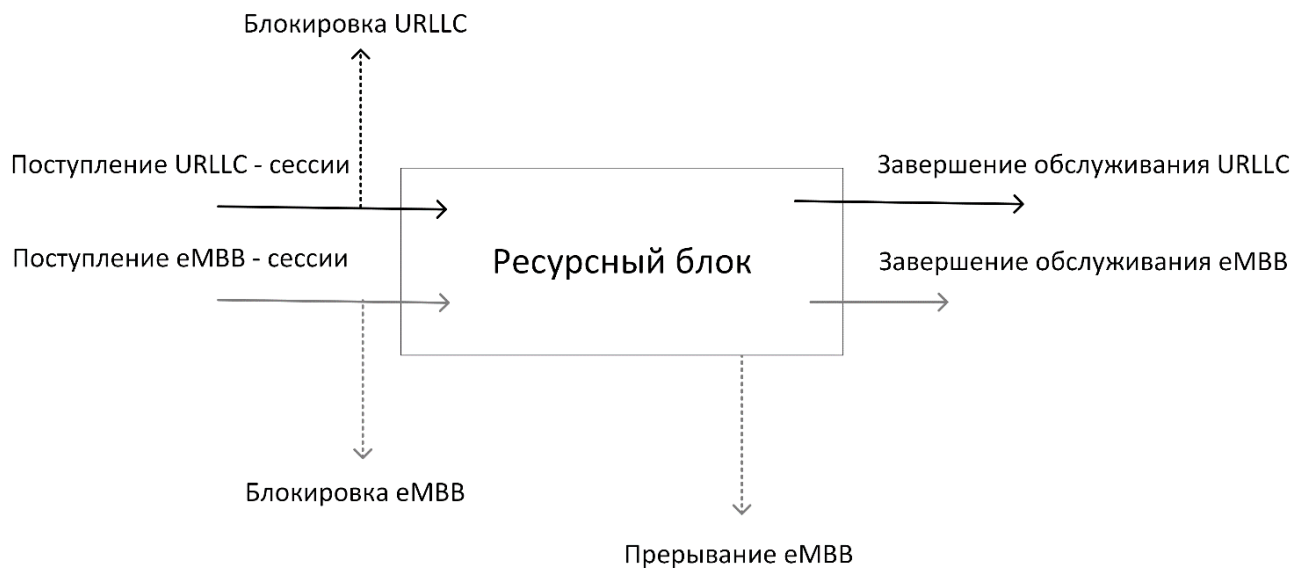


Рис. 2.4 Схема доступа модели с прерыванием обслуживания

Для учета зависимого занятия ресурса разработанная модель с прерыванием обслуживания широкополосного трафика представлена в виде ресурсной системы массового обслуживания со схемой, показанной на Рис. 2.5, и описывается двумерным марковским случайным процессом $X(t), t \geq 0$, где состояние (n_m, n_u) описывает число обслуживающихся сессий широкополосного и узкополосного трафика соответственно.

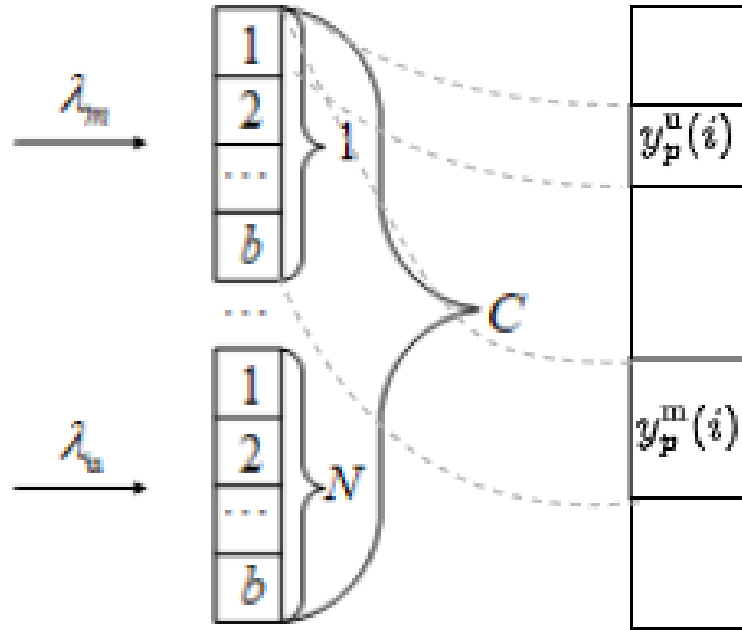


Рис. 2.5 Схема СМО с прерыванием обслуживания

Пространство состояний такой системы имеет вид

$$\mathcal{X} = \{(n_m, n_u) : n_m \geq 0, n_u \geq 0, bn_m + n_u \leq C\}. \quad (2.10)$$

В данной модели ресурс разделяется между сессиями согласно циклическому алгоритму согласно которому временной интервал делиться поровну между ПУ $y_t = 1/u$, мощность сигнала устанавливается так, чтобы обеспечить необходимую скорость передачи данных для каждого ПУ. Пример распределения ресурсов между ПУ показан на Рис. 2.6. Тогда требование к ресурсу и множество всех вариантов занятия ресурса в случае разделения ресурса по времени представимы в виде

$$y(u) = \left(y_f = F, y_t = \frac{1}{u}, y_p(y_f, y_t) = \frac{PL(N_0 + I_0)}{G_t G_r} \left[2^{\frac{bu}{F}} - 1 \right] \right), u > 0.$$

$$y(u) = \left\{ \begin{array}{l} (y_1, \dots, y_u) : y_f(i) = F, y_t(i) = \frac{1}{u}, \\ y_p(i) = \frac{PL(N_0 + I_0)}{G_t G_r} (2^{bu/F} - 1) \leq P, i = \overline{1, u}, PL > 0 \end{array} \right\}, u = 1, 2, \dots$$

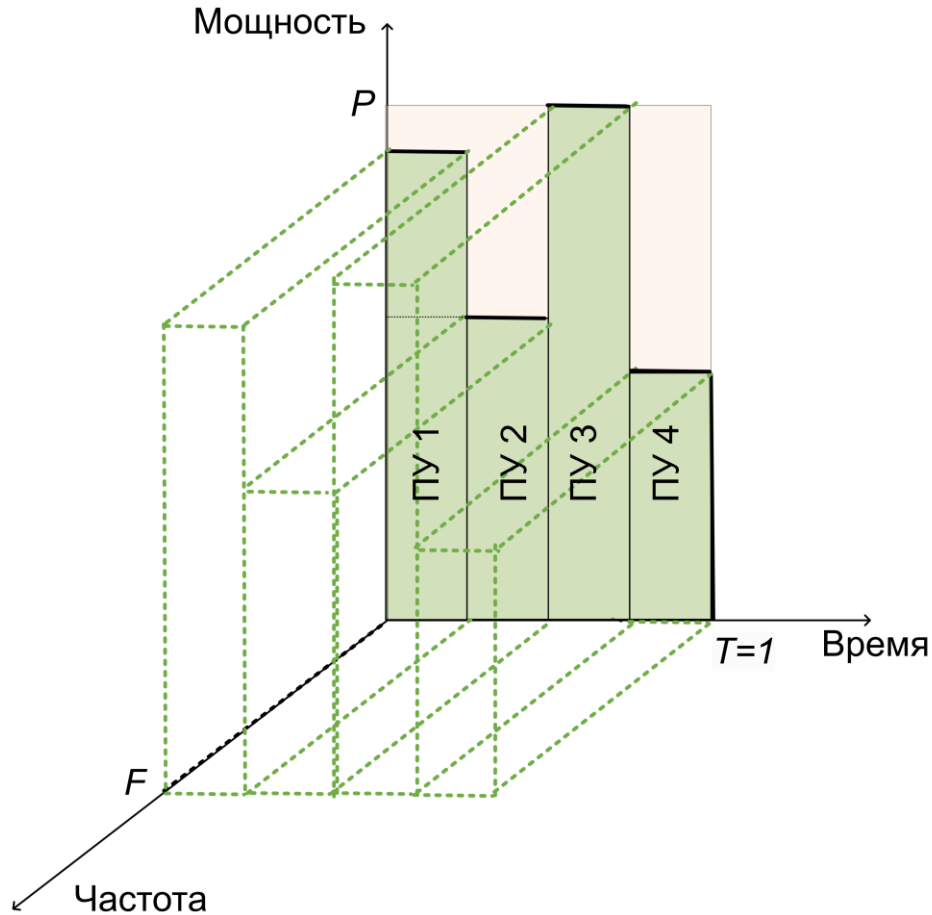


Рис. 2.6 Пример распределения ресурса с равным делением по времени и настраиваемой мощностью передачи

Переходя к модели с прерыванием обслуживания широкополосного трафика, ресурсы распределяются 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 имеют следующий вид соответственно:

$$\mathbf{y}^u(n_m, n_u) = \left(y_f^u = F, y_t^u = \frac{1}{n_u + n_m}, y_p^u = P \right), (n_m, n_u) \in \mathcal{X} \setminus (\mathbf{0}), \quad (2.11)$$

$$\mathbf{y}^m(n_m, n_u) = \left(y_f^m = F, y_t^m = \frac{1}{n_u + n_m}, y_p^m = \frac{PL(N_0 + I_0)}{G_t G_r} \left[2^{\frac{b(n_u + n_m)}{F}} - 1 \right] \right), \quad (2.12)$$

$$(n_m, n_u) \in \mathcal{X} \setminus (\mathbf{0}),$$

$$\mathbf{y}^u(\mathbf{0}) = \mathbf{y}^m(\mathbf{0}) = (0, 0, 0),$$

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

$$(n_m, n_u) \in \mathcal{X} \setminus (\mathbf{0}),$$

$$\mathcal{Y}(\mathbf{0}) = \{(0, 0, 0)\},$$

$$\mathcal{Y}(n_m, n_u) = \emptyset, (n_m, n_u) \notin \mathcal{X}.$$

(2.13)

Таким образом, принятие новых запросов начать обслуживание зависит от занятости ресурса. Формулы для расчета условных вероятностей принятия нового запроса начать обслуживание широкополосного и узкополосного трафика будут вычисляться согласно лемме 2.2 и утверждению 2.2, представленным ниже.

Утверждение 2.2. Если требования к ресурсу для сессий узкополосного и широкополосного трафика имеют вид (2.11), (2.12) соответственно и множество всех вариантов занятия ресурса (2.13), тогда вероятность того, что уже обслуживается $(n_m, n_u) \in \mathcal{X}$ сессий, равна

$$A(n_m, n_u) = \left[F_{\xi_{PL}} \left(P \frac{G_t G_r}{N_0 + I_0} \frac{1}{2^{\frac{b(n_u + n_m)}{F}} - 1} \right) \right]^{n_m}, \quad (2.14)$$

где $F_{\xi_{PL}}(\cdot)$ задается леммой 2.1.

Доказательство.

Вероятность того, что уже установлено $n_m + n_u$ сессий в системе равна вероятности, что общая мощность передачи не должна превышать максимума P , тогда искомая вероятность может быть записана в виде

$$\begin{aligned}
 A(n_m, n_u) &= P\left\{\left(y_1^m, \dots, y_{n_m}^m, y_1^u, \dots, y_{n_u}^u\right) \in \mathcal{Y}(n_m, n_u)\right\} = \\
 &= P\left\{y_p^m(k, j) = \frac{PL(N_0 + I_0)}{G_t G_r} \left[2^{\frac{n_m + n_u}{F b_k}} - 1\right] \leq P, \quad j = \overline{1, n_m}\right\} = \\
 &= \left[\frac{PL(N_0 + I_0)}{G_t G_r} \left[2^{\frac{n_m + n_u}{F b_k}} - 1\right] \leq P\right]^{\sum_{k=1}^K m_k} = \\
 &= \left[P\left\{PL \geq \frac{P G_t G_r}{N_0 + I_0} \left(2^{\frac{n_m + n_u}{F b_k}} - 1\right)^{-1}\right\}\right]^{\sum_{k=1}^K m_k}, \quad \mathbf{x} \in \mathcal{X}.
 \end{aligned}$$

Так как мощность затухания сигнала PL является случайной величиной согласно модели затухания сигнала, тогда $P\{\xi_{PL} \leq x\}$ является функцией распределения СВ $F_{\xi_{PL}}(x)$ по определению и получаем (3.7).

Утверждение доказано. $\square$

Лемма 2.2. Если требования к ресурсу и множество всех вариантов занятия ресурса имеют вид согласно утверждению 2.2, тогда вероятности принятия новых запросов узкополосного и широкополосного трафика, при условии того, что уже обслуживается $(n_m, n_u) \in \mathcal{X}$ сессий, вычисляются соответственно по следующим формулам

$$p_u(n_m, n_u) = \left[F_{\xi_{PL}}\left(\frac{B}{2 \frac{b(n_u + 1 + n_m)}{F} - 1}\right)\right]^{n_m} \left[\left[F_{\xi_{PL}}\left(\frac{B}{2 \frac{b(n_u + n_m)}{F} - 1}\right)\right]^{n_m}\right]^{-1}, \quad (2.15)$$

$$p_m(n_m, n_u) = \left[F_{\xi_{PL}} \left(\frac{B}{2 \frac{b(n_u + n_m + 1)}{F} - 1} \right) \right]^{n_m + 1} \left[\left(F_{\xi_{PL}} \left(\frac{B}{2 \frac{b(n_u + n_m)}{F} - 1} \right) \right)^{n_m} \right]^{-1}, \quad (2.16)$$

где $B = \frac{PG_t G_r}{N_0 + I_0}$.

Доказательство. Вероятности принятия новых запросов узкополосного и широкополосного трафика $p_u(n_m, n_u)$ и $p_m(n_m, n_u)$ соответствуют тому, что число обслуживаемых сессий узкополосного трафика станет $n_u + 1$, т.е. будет состояние $(n_m, n_u + 1)$, и число обслуживаемых сессий широкополосного трафика - $n_m + 1$, т.е. будет состояние $(n_m + 1, n_u)$ соответственно. Тогда условные вероятности принятия новых сессий узкополосного и широкополосного трафика, когда в системе уже обслуживается $n_m + n_u$ сессий примут вид

$$p_u(n_m, n_u) = \frac{A(n_m, n_u + 1)}{A(n_m, n_u)},$$

$$p_m(n_m, n_u) = \frac{A(n_m + 1, n_u)}{A(n_m, n_u)}.$$

Записав данные вероятности согласно утверждению 2.2, получим искомые формулы для расчета условных вероятностей.

Лемма доказана. □

С учетом полученных условных вероятностей принятия новых запросов диаграмма интенсивностей переходов для произвольного состояния $(n_m, n_u) \in \mathcal{X}$ представлена на Рис. 2.7.

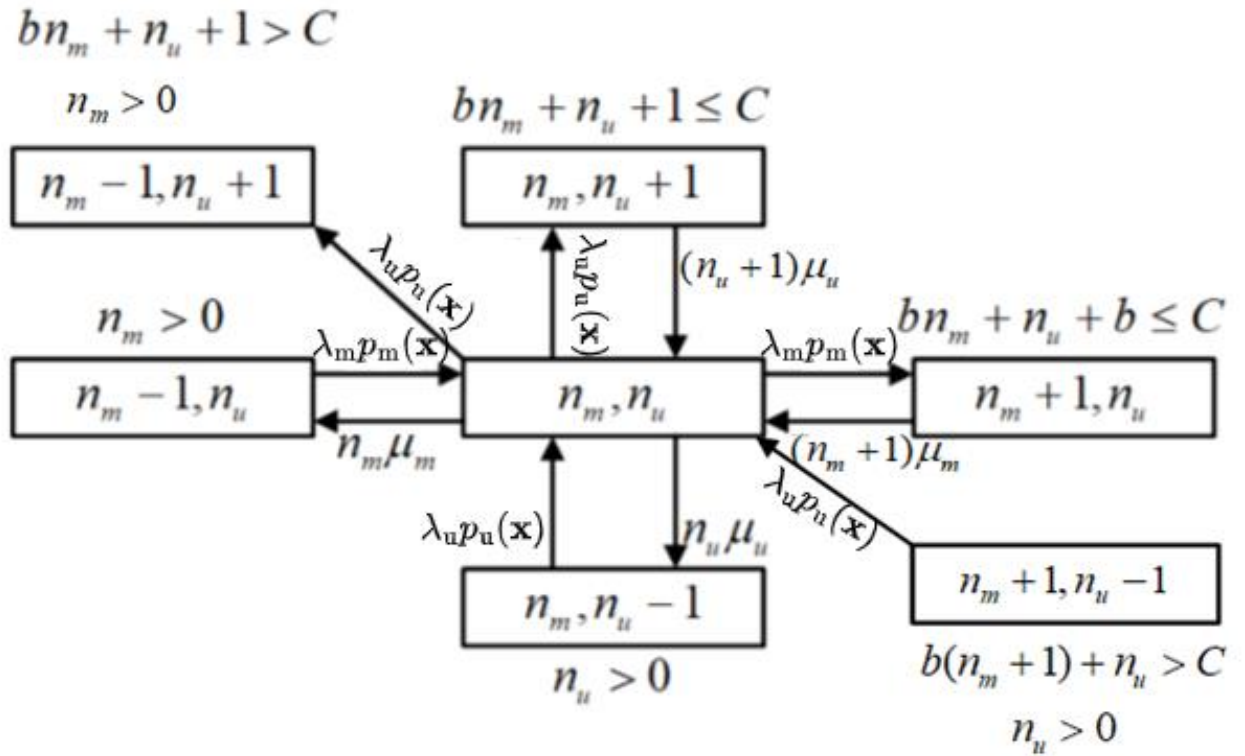


Рис. 2.7 Диаграмма переходов для центрального состояния $(n_m, n_u) \in \mathcal{X}$ модели с прерыванием обслуживания

Зная стационарные распределения $\pi(n_m, n_u)$ и условные вероятности принятия новых запросов $p_u(n_u, n_m)$ и $p_m(n_u, n_m)$, $(n_m, n_u) \in \mathcal{X}$ можно рассчитать следующие показатели эффективности передачи широкополосного трафика:

1. Среднее число обслуживаемых сессий

$$\bar{n}_m = \sum_{n_m=1}^N n_m \sum_{n_u=0}^{C-bn_m} \pi(n_m, n_u).$$

2. Вероятность блокировки нового запроса

$$P_m^{bl} = \sum_{n_u=0}^C \pi\left(\left[\frac{C-n_u}{b}\right], n_u\right) \left(1 - p_m\left(\left[\frac{C-n_u}{b}\right], n_u\right)\right).$$

3. Вероятность прерывания обслуживания сессий

$$P^{\text{in}} = \sum_{n_m=1}^{N-1} \pi(n_m, C - bn_m) \frac{\lambda_u p_u(n_m, C - bn_m)}{\lambda_u p_u(n_m, C - bn_m) + n_m \mu_m + n_u \mu_u} \frac{1}{n_m} +$$

$$+ \pi(N, C - bN) \frac{\lambda_u p_u(N, C - bN)}{\lambda_u p_u(N, C - bN) + N \mu_m} \frac{1}{N}.$$

4. Коэффициент использования системы

$$UTIL = \frac{1}{C} \sum_{n_m=0}^N \sum_{n_u=0}^{C-bn_m} (bn_m + n_u) \pi(n_m, n_u).$$

2.4. Матричный алгоритм расчета стационарного распределения

Далее для данной модели сформулировано и доказано утверждение, представляющее матрицу интенсивностей переходов Λ в трехдиагональном блочном виде, и сформулирована и доказана лемма о нахождении стационарного распределения вероятностей $\pi\Lambda = \mathbf{0}$, $\pi e^T = 1$.

Утверждение 2.3. Если на множестве $\mathcal{X}$ введен лексикографический порядок:

$$(n'_m, n'_u) > (n_m, n_u) \Leftrightarrow n'_m > n_m \text{ или } (n'_m = n_m, n'_u > n_u), \quad (2.17)$$

тогда матрица интенсивностей переходов СП $X(t)$ представима в блочном трехдиагональном виде

$$\Lambda = \begin{pmatrix} \Lambda_{00} & \Lambda_{11} & \mathbf{0} & \cdot & \mathbf{0} \\ \Lambda_{21} & \Lambda_{01} & \Lambda_{12} & \cdot & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \Lambda_{22} & \cdot & \cdot & \mathbf{0} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \Lambda_{1N} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \Lambda_{2N} & \Lambda_{0N} \end{pmatrix} \quad (2.18)$$

где блоки матрицы Λ имеют размерности:

$$\begin{aligned}
 \Lambda_{0k} &: (C - bk + 1) \times (C - bk + 1), \quad k = \overline{0, N}, \\
 \Lambda_{1k} &: (C - b(k - 1) + 1) \times (C - bk + 1), \quad k = \overline{1, N}, \\
 \Lambda_{2k} &: (C - bk + 1) \times (C - b(k - 1) + 1), \quad k = \overline{1, N}.
 \end{aligned} \tag{2.19}$$

а ненулевые положительные элементы матриц $\Lambda_{0k}, \Lambda_{1k}, \Lambda_{2k}$ вычисляются по формулам

$$\Lambda_{0k}((n_m, n_u), (n'_m, n'_u)) = \begin{cases} \lambda_u p_u(n_m, n_u), & n'_m = n_m, \quad n'_u = n_u + 1, \\ n_u \mu_u, & n'_m = n_m, \quad n'_u = n_u - 1, \\ *, & n'_m = n_m, \quad n'_u = n_u, \end{cases} \tag{2.20}$$

где $*$ =
$$-\left(\begin{aligned} & n_u \mu_u + \lambda_u p_u(n_m, n_u) I(n_u < C) + \\ & + \lambda_m p_m(n_m, n_u) I(bn_m + n_u \leq C - b) + \\ & + n_m \mu_m + \lambda_u p_u(n_m, n_u) I(bn_m + n_u = C, n_m > 0) \end{aligned} \right).$$

$$\Lambda_{1k}((n_m, n_u), (n'_m, n'_u)) = \{ \lambda_m p_m(n_m, n_u), \quad n'_m = n_m + 1, \quad n'_u = n_u. \} \tag{2.21}$$

$$\Lambda_{2k}((n_m, n_u), (n'_m, n'_u)) = \begin{cases} \lambda_u p_u(n_m, n_u) & n'_m = n_m - 1, \quad n'_u = n_u + 1, \quad bn_m + n_u = C, \\ n_m \mu_m & n'_m = n_m - 1, \quad n'_u = n_u. \end{cases} \tag{2.22}$$

Доказательство: Разобьем пространство $\mathcal{X}$ на подмножества по возрастанию числа обслуживающихся сессий широкополосного трафика n_m , т.е. пространство состояний $\mathcal{X}$ разбивается на подмножества $\mathcal{X}_k = \{(n_m, n_u) \in \mathcal{X} : n_m = k\}$, $k = \overline{0, N}$,

такие что $\mathcal{X} = \bigcup_{k=0}^N \mathcal{X}_k$:

$$\begin{aligned}
 \mathcal{X}_0 &= \{(0, 0), (0, 1), (0, 2), \dots, (0, C)\}, \\
 \mathcal{X}_1 &= \{(1, 0), \dots, (1, C - b)\}, \\
 \mathcal{X}_2 &= \{(2, 0), \dots, (2, C - 2b)\}, \\
 &\vdots \\
 \mathcal{X}_{N-1} &= \{(N - 1, 0), \dots, (N - 1, b)\}, \\
 \mathcal{X}_N &= \{(N, 0)\},
 \end{aligned} \tag{2.23}$$

тогда подмножества $\mathcal{X}_k$, $k = \overline{0, N}$ имеют вид

$$\mathcal{X}_k = \{(k, 0), \dots, (k, n_u), \dots, (k, C - bk)\}, \quad k = \overline{0, N}$$

Далее введем лексикографический порядок, согласно которому состояния внутри каждого подмножества $\mathcal{X}_k, k = \overline{0, N}$ сортируются по возрастанию числа обслуживаемых сессий узкополосного трафика n_u : $\forall (n'_m, n'_u), (n_m, n_u) \in \mathcal{X}_k, (n'_m, n'_u) > (n_m, n_u) \Leftrightarrow (n'_m = n_m \text{ и } n'_u > n_u)$. Таким образом

- Блоки верхней диагонали Λ_{1k} представляют переходы СП из состояний множества $\mathcal{X}_{k-1}$ в состояния множества $\mathcal{X}_k, k = \overline{1, N}$.
- Блоки нижней диагонали Λ_{2k} представляют переходы СП из состояний множества $\mathcal{X}_k$ в состояния множества $\mathcal{X}_{k-1}, k = \overline{1, N}$.
- Блоки центральной диагонали Λ_{0k} представляют переходы СП внутри множества $\mathcal{X}_k, k = \overline{0, N}$.

Ненулевой элемент (*) из (2.20) представляет сумму всех «выходящих» интенсивностей из рассматриваемого состояния:

$$n_u \mu_u + \lambda_u p_u(n_m, n_u) I(n_u < C) + \lambda_m p_m(n_m, n_u) I(bn_m + n_u \leq C - b) + n_m \mu_m + \lambda_u p_u(n_m, n_u) I(bn_m + n_u = C, n_m > 0)$$

Соответственно, ненулевые элементы блоков будут определяться согласно формулами (2.20) - (2.22) по построению.

$$\Lambda_{1k} = \begin{bmatrix} \lambda_m & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \lambda_m & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \lambda_m \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}, k = \overline{1, N}.$$

$$\Lambda_{0k} = \begin{bmatrix} -(\lambda_u + \lambda_m) & \lambda_u & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ n_u \mu_u & -\begin{pmatrix} \lambda_u + \lambda_m \\ + n_u \mu_u \end{pmatrix} & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots \\ 0 & n_u \mu_u & \ddots & \lambda_u & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & -\begin{pmatrix} \lambda_u + \lambda_m \\ + n_u \mu_u \end{pmatrix} & \lambda_u & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & n_u \mu_u & -(\lambda_u + n_u \mu_u) & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & n_u \mu_u & \ddots & \lambda_u & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & -(\lambda_u + n_u \mu_u) & \lambda_u \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & n_u \mu_u & -(n_u \mu_u) \end{bmatrix}, \quad k = 0.$$

$$\Lambda_{0k} = \begin{bmatrix} -\begin{pmatrix} \lambda_u + \lambda_m \\ + k \mu_m \end{pmatrix} & \lambda_u & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ n_u \mu_u & -\begin{pmatrix} \lambda_u + n_u \mu_u \\ + \lambda_m + k \mu_m \end{pmatrix} & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots \\ 0 & n_u \mu_u & \ddots & \lambda_u & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & -\begin{pmatrix} \lambda_u + n_u \mu_u \\ + \lambda_m + k \mu_m \end{pmatrix} & \lambda_u & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & n_u \mu_u & -\begin{pmatrix} \lambda_u + n_u \mu_u \\ + k \mu_m \end{pmatrix} & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & n_u \mu_u & \ddots & \lambda_u & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & -\begin{pmatrix} \lambda_u + n_u \mu_u \\ + k \mu_m \end{pmatrix} & \lambda_u \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & n_u \mu_u & -\begin{pmatrix} n_u \mu_u + \lambda_u \\ + k \mu_m \end{pmatrix} \end{bmatrix},$$

$$k = \overline{1, N-1}.$$

$$\Lambda_{0k} = [-(\lambda_u + k \mu_m)], \quad k = N.$$

$$\Lambda_{2k} = \begin{bmatrix} k \mu_m & 0 & \dots & \vdots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & k \mu_m & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & k \mu_m & \lambda_u & \dots & 0 \end{bmatrix}, \quad k = \overline{1, N}.$$

Далее докажем, что размерность блоков определяется соотношениями (2.19). Из пространства состояний системы $\mathcal{X}$ известно, что $bn_m + n_u \leq C$, тогда размерность подмножества $\mathcal{X}_k$, где $k = n_m$, равна $C - bk + 1$. Блок Λ_{1k}

представляет собой переходы из состояний множества $\mathcal{X}_{k-1}$ в состояния множества $\mathcal{X}_k$, $k = \overline{1, N}$, т.е. размерность блока $\Lambda_{1k} = (C - b(k-1) + 1) \times (C - bk + 1)$. Действуя аналогично для блоков Λ_{0k} и Λ_{2k} , получим все соотношения (2.19) соответственно.

Утверждение доказано. $\square$

Разделим макро вектор стационарных вероятностей

$$\pi = \{\pi(0,0), \pi(0,1), \dots, \pi(0, n_u), \dots, \pi(n_m, n_u)\},$$

где $(n_m, n_u) \in \mathcal{X}$, согласно лексикографическому порядку (2.17) и получим следующие компоненты $\pi_k, k = \overline{0, N}$:

$$\begin{aligned} \pi_0 &= \{\pi(0,0), \pi(0,1), \dots, \pi(0, C)\} \\ \pi_1 &= \{\pi(1,0), \pi(1,1), \dots, \pi(0, C-b)\} \\ &\vdots \\ \pi_N &= \{\pi(N,0), \pi(N,1), \dots, \pi(0, C-bN)\} \end{aligned}$$

Тогда компоненты $\pi_k, k = \overline{0, N}$ имеют вид

$$\pi_k = \{\pi(k,0), \pi(k,1), \dots, \pi(0, C-bk)\}, \quad k = \overline{0, N}.$$

Лемма 2.3. Стационарные вероятности состояний модели с прерыванием обслуживания вычисляются в матричном виде по формуле

$$\pi_k = \pi_N \prod_{j=1}^{N-k} \mathbf{M}_{N-j}, \quad k = \overline{0, N-1}. \quad (2.24)$$

где вектор π_N , является единственным решением системы уравнений

$$\begin{cases} \pi_N \sum_{k=0}^N \prod_{j=1}^{N-k} \mathbf{M}_{N-j} \mathbf{e}^T = 1, \\ \pi_N (\mathbf{M}_{N-1} \Lambda_{1N} + \Lambda_{0N}) = \mathbf{0}. \end{cases} \quad (2.25)$$

где $\mathbf{e}^T$ единичный вектор размерности $C - bk + 1$,

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

$$\begin{aligned}\mathbf{M}_0 &= -\Lambda_{21}\Lambda_{00}^{-1}, \\ \mathbf{M}_k &= -\Lambda_{2,k+1}(M_{k-1}\Lambda_{1k} + \Lambda_{0k})^{-1}, \quad k = \overline{1, N-1}.\end{aligned}\tag{2.26}$$

Доказательство.

Доказательство аналогично доказательству Лемма 1.1, раздел 1.4.

Лемма доказана. $\square$

2.5. Алгоритм снижения размерности системы уравнений равновесия

В данном разделе сформулирована и доказана лемма рекуррентного алгоритма для снижения размерности системы уравнений равновесия модели приоритетной передачи с прерыванием обслуживания широкополосного трафика для упрощения её решения.

Лемма 2.4. Для модели с прерыванием обслуживания широкополосного трафика ненормированные вероятности $q(n_m, n_u)$ вычисляются согласно следующим формулам

$$q(N, 0) = X_N = 1, \tag{2.27}$$

$$q(i, 0) = X_{n_m}, \quad i = \overline{0, N-1}, \tag{2.28}$$

$$q(n_m, n_u) = \sum_{i=0}^N a_i(n_m, n_u) X_i, \tag{2.29}$$

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

$$a_i(i, 0) = 1, \quad a_i(n_m, 0) = 0, \quad n_m = \overline{0, N}, \quad n_m \neq i; \tag{2.30}$$

$$\begin{aligned}
 a_i(n_m, n_u) = & \frac{1}{n_u \mu_u} \left[a_i(n_m, n_u - 1) \left[\lambda_m p_m(n_m, n_u - 1) I(bn_m + n_u - 1 + b \leq C) + \right. \right. \\
 & + n_m \mu_m + (n_u - 1) \mu_u + \lambda_u p_u(n_m, n_u - 1) I(bn_m + n_u \leq C) + \\
 & + \lambda_u p_u(n_m, n_u - 1) I(bn_m + n_u > C, n_m > 0) \left. \right] - \\
 & - a_i(n_m - 1, n_u - 1) \lambda_m p_m(n_m - 1, n_u - 1) I(n_m > 0) - \\
 & - a_i(n_m, n_u - 2) \lambda_u p_u(n_m, n_u - 2) I(n_u > 1) - \\
 & - a_i(n_m + 1, n_u - 2) \lambda_u p_m(n_m + 1, n_u - 2) I(b(n_m + 1) + n_u - 2 = C, n_u > 1) - \\
 & - a_i(n_m + 1, n_u - 1) (n_m + 1) \mu_m I(b(n_m + 1) + n_u - 1 \leq C) \left. \right], \\
 (n_m, n_u) \in & \left\{ (n_m, n_u) \in \mathcal{X} : 0 < n_u \leq C - bn_m \right\},
 \end{aligned} \tag{2.31}$$

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

$$\begin{cases} \sum_{i=0}^{N-1} \beta_i(n_m) X_i + \beta_N(n_m) = 0, \\ \beta_i(n_m) = a_i(n_m, C - bn_m) \left[\lambda_u p_u(n_m, C - bn_m) + n_m \mu_m + (C - bn_m) \mu_u \right] - \\ \quad - a_i(n_m - 1, C - bn_m) \lambda_m p_m(n_m - 1, C - bn_m) \\ \quad - a_i(n_m, C - bn_m - 1) \lambda_u p_u(n_m, C - bn_m - 1), \end{cases} \tag{2.32}$$

$i = \overline{0, N}, n_m = \overline{1, N-1}.$

Доказательство. 1. Поделим пространство состояний $\mathcal{X}$ по количеству обслуживаемых сессий узкополосного трафика следующим образом:

$$\mathcal{X} = \mathcal{X}_0 \cup \mathcal{X}_\alpha \cup \mathcal{X}_\beta,$$

$$\mathcal{X}_0 = \left\{ (n_m, n_u) \in \mathcal{X} : n_u = 0 \right\} = \left\{ (n_m, 0) \in \mathcal{X} \right\},$$

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

$$\mathcal{X}_\beta = \left\{ (n_m, n_u) \in \mathcal{X} : n_u = C - bn_m \right\} = \left\{ (n_m, C - bn_m) \in \mathcal{X}, n_m < N \right\}.$$

2. Выпишем СУР для системы по данному разбиению пространства:

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

3. Выразим состояния подмножеств $\mathcal{X}_\alpha$ и $\mathcal{X}_\beta$ через состояния подмножества $\mathcal{X}_0$, «двигаясь вверх», согласно Рис. 2.8.

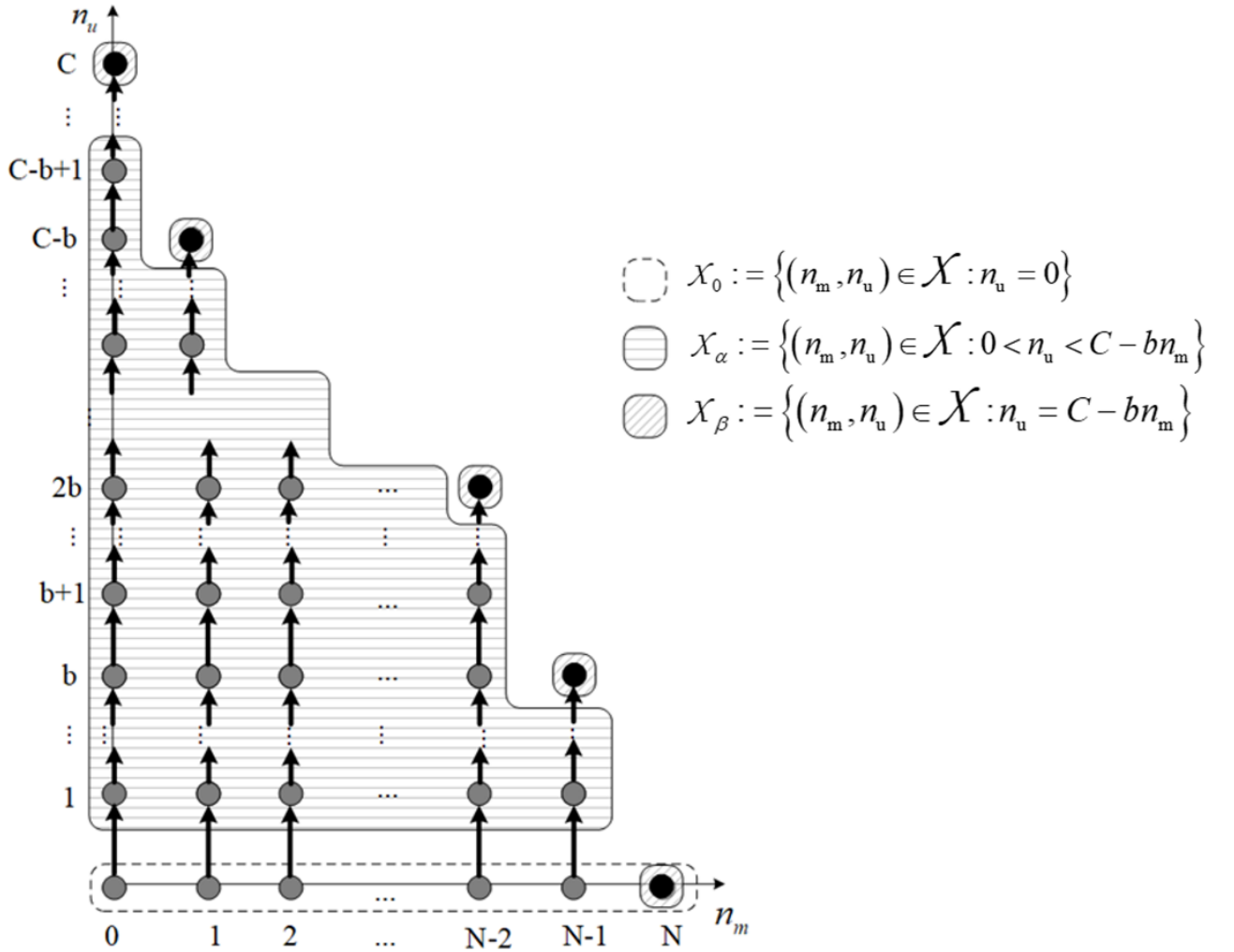


Рис. 2.8 Принцип выражения нестационарных вероятностей

Предположим, что $q(N, 0) = X_N = 1$, тогда справедливо следующее

$$\begin{aligned} q(N, 0) &= \sum_{i=0}^N \alpha_i(N, n_u) X_i = \sum_{i=0}^{N-1} \alpha_i(N, n_u) X_i + \alpha_N(N, n_u) X_N \\ \Rightarrow \sum_{i=0}^{N-1} \alpha_i(N, n_u) X_i + \alpha_N(N, n_u) &= 1, \\ \alpha_i(N, n_u) &= 0, \\ \alpha_N(N, n_u) &= 1. \end{aligned}$$

Выразим $q(N-1, 0)$ согласно следующему

$$\pi(N, 0)(\lambda_u p_u(N, 0) + N\mu_m) = \lambda_m p_m(N-1, 0)\pi(N-1, 0),$$

тогда получим

$$\begin{aligned} q(N, 0)(\lambda_u p_u(N, 0) + N\mu_m) &= \lambda_m p_m(N-1, 0)q(N-1, 0), \\ q(N-1, 0) &= \frac{\lambda_u p_u(N, 0) + N\mu_m}{\lambda_m p_m(N-1, 0)} q(N, 0) = \frac{\lambda_u p_u(N, 0) + N\mu_m}{\lambda_m p_m(N-1, 0)} = X_{N-1}. \end{aligned}$$

Далее согласно уравнению СУР для состояния $(n_m, n_u - 1)$ выразим $q(n_m, n_u)$, получим:

$$\begin{aligned} q(n_m, n_u) n_u \mu_u I\{bn_m + n_u \leq C\} &= \\ &= q(n_m, n_u - 1) \left[\lambda_m p_m(n_m, n_u - 1) I\{bn_m + n_u - 1 + b \leq C\} + \right. \\ &\quad + \lambda_u p_u(n_m, n_u - 1) I\{bn_m + n_u \leq C\} + \\ &\quad + \lambda_u p_u(n_m, n_u - 1) I\{bn_m + n_u > C, n_m > 0\} + n_m \mu_m + (n_u - 1) \mu_u \left. \right] - \\ &\quad - q(n_m - 1, n_u - 1) \lambda_m p_m(n_m - 1, n_u - 1) I\{n_m > 0\} - \\ &\quad - q(n_m, n_u - 2) \lambda_u p_u(n_m, n_u - 2) I\{n_u - 1 > 0\} - \\ &\quad - q(n_m + 1, n_u - 2) \lambda_u p_u(n_m + 1, n_u - 2) I\{b(n_m + 1) + n_u - 2 = C, n_u - 1 > 0\} - \\ &\quad - q(n_m + 1, n_u - 1) (n_m + 1) \mu_m I\{b(n_m + 1) + n_u - 1 \leq C\}, \\ (n_m, n_u - 1) &\in \mathcal{X}_0 \cup \mathcal{X}_\alpha \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 q(n_m, n_u) n_u \mu_u = & \\
 = q(n_m, n_u - 1) & \left[\lambda_m p_m(n_m, n_u - 1) I\{bn_m + n_u - 1 + b \leq C\} + \right. \\
 & + \lambda_u p_u(n_m, n_u - 1) I\{bn_m + n_u \leq C\} + \lambda_u p_u(n_m, n_u - 1) I\{bn_m + n_u > C, n_m > 0\} \\
 & \left. + n_m \mu_m + (n_u - 1) \mu_u \right] = \\
 & - q(n_m - 1, n_u - 1) \lambda_m p_m(n_m - 1, n_u - 1) I\{n_m > 0\} - \\
 & - q(n_m, n_u - 2) \lambda_u p_u(n_m, n_u - 2) I\{n_u > 1\} - \\
 & - q(n_m + 1, n_u - 2) \lambda_u p_u(n_m + 1, n_u - 2) I\{b(n_m + 1) + n_u - 2 = C, n_u > 1\} - \\
 & - q(n_m + 1, n_u - 1) (n_m + 1) \mu_m I\{b(n_m + 1) + n_u - 1 \leq C\}, \\
 & (n_m, n_u) \in \mathcal{X}_\alpha \cup \mathcal{X}_\beta
 \end{aligned}$$

Подставив $q(n_m, n_u) = \sum_{i=0}^N \alpha_i(n_m, n_u) X_i$ и исключив состояние $(0, C)$, получим:

$$\begin{aligned}
 q(n_m, C - bn_m) & \left[\lambda_u p_u(n_m, C - bn_m) + n_m \mu_m + (C - bn_m) \mu_u \right] - \\
 & - q(n_m - 1, C - bn_m) \lambda_m p_m(n_m - 1, C - bn_m) \\
 & - q(n_m, C - bn_m - 1) \lambda_u p_u(n_m, C - bn_m - 1) = 0, \\
 n_m = \overline{1, N-1}.
 \end{aligned}$$

Обозначим коэффициенты $\beta_i(n_m)$ следующим образом

$$\begin{aligned}
 \beta_i(n_m) = \alpha_i(n_m, C - bn_m) & \left[\lambda_u p_u(n_m, C - bn_m) + n_m \mu_m + (C - bn_m) \mu_u \right] - \\
 & - \alpha_i(n_m - 1, C - bn_m) \lambda_m p_m(n_m - 1, C - bn_m) \\
 & - \alpha_i(n_m, C - bn_m - 1) \lambda_u p_u(n_m, C - bn_m - 1), \\
 i = \overline{0, N}, \quad n_m = \overline{1, N-1},
 \end{aligned}$$

тогда

$$\sum_{i=0}^{N-1} \beta_i(n_m) X_i + \beta_N(n_m) = 0, \quad n_m = \overline{1, N-1},$$

Лемма доказана. $\square$

ГЛАВА 3

МОДЕЛЬ СО СНИЖЕНИЕМ СКОРОСТИ ШИРОКОПОЛОСНОГО ТРАФИКА

3.1. Построение модели с адаптивной скоростью передачи данных

В главе 3 получен результат номер №3. Главной целью данной главы является построение системы массового обслуживания для приоритетного доступа узкополосного трафика со снижением скорости передачи широкополосного трафика [100]. В главе 2 сформулирована модель приоритетной передачи с прерыванием передачи широкополосного трафика при поступлении нового запроса узкополосного трафика. Такая схема приводит к большим потерям для широкополосного трафика и применима не для всех сценариев использования умного города, как говорилось выше. В отличие от модели, рассмотренной во второй главе, текущая модель использует взвешенный циклический алгоритм (англ. Weighted Round Robbin, WRR) распределения ресурсов. Согласно этому алгоритму, канал разделяется с учётом дискриминаторного деления кадра и весовых коэффициентов, соответствующих скоростям широкополосного трафика. Частота остаётся неизменной, а мощность меняется только для сессий с широкополосным трафиком, оставаясь постоянной для узкополосных сессий.

Перейдем к построению модели приоритетной передачи со снижением скорости передачи широкополосного трафика. Системная модель имеет вид аналогичный, описанной в разделе 2.3. В данной модели узкополосный трафик передает данные с постоянной скоростью, $d=1$. Однако скорость передачи широкополосного трафика является адаптивной, может принимать одно значение из вектора уровней скорости $\mathbf{b}=(b_1, \dots, b_K)$, $b_1 > \dots > b_K$, соответствующей b_k

скорости передачи уровня $k = \overline{1, K}$. Широкополосный трафик начинает обслуживаться со скоростью передачи b_1 . Таким образом, $N = C/b_1$ - максимальное число обслуживаемых сессий широкополосного трафика в системе одновременно. Приоритет узкополосного трафика обеспечивается следующим образом: если в случае занятости канала и при поступлении нового запроса узкополосного трафика начать обслуживание, тогда, при наличии обслуживаемой сессии широкополосного трафика не на минимальной скорости, скорость передачи сессии широкополосного трафика будет снижена, а новый запрос будет принят. В случае, когда сессия широкополосного трафика обслуживается уже на минимальной скорости, тогда она будет прервана. После завершения обслуживания сессии узкополосного трафика сниженная скорость передачи широкополосного трафика будет восстановлена. Схема приоритетной передачи со снижением скорости показана на Рис. 3.1.

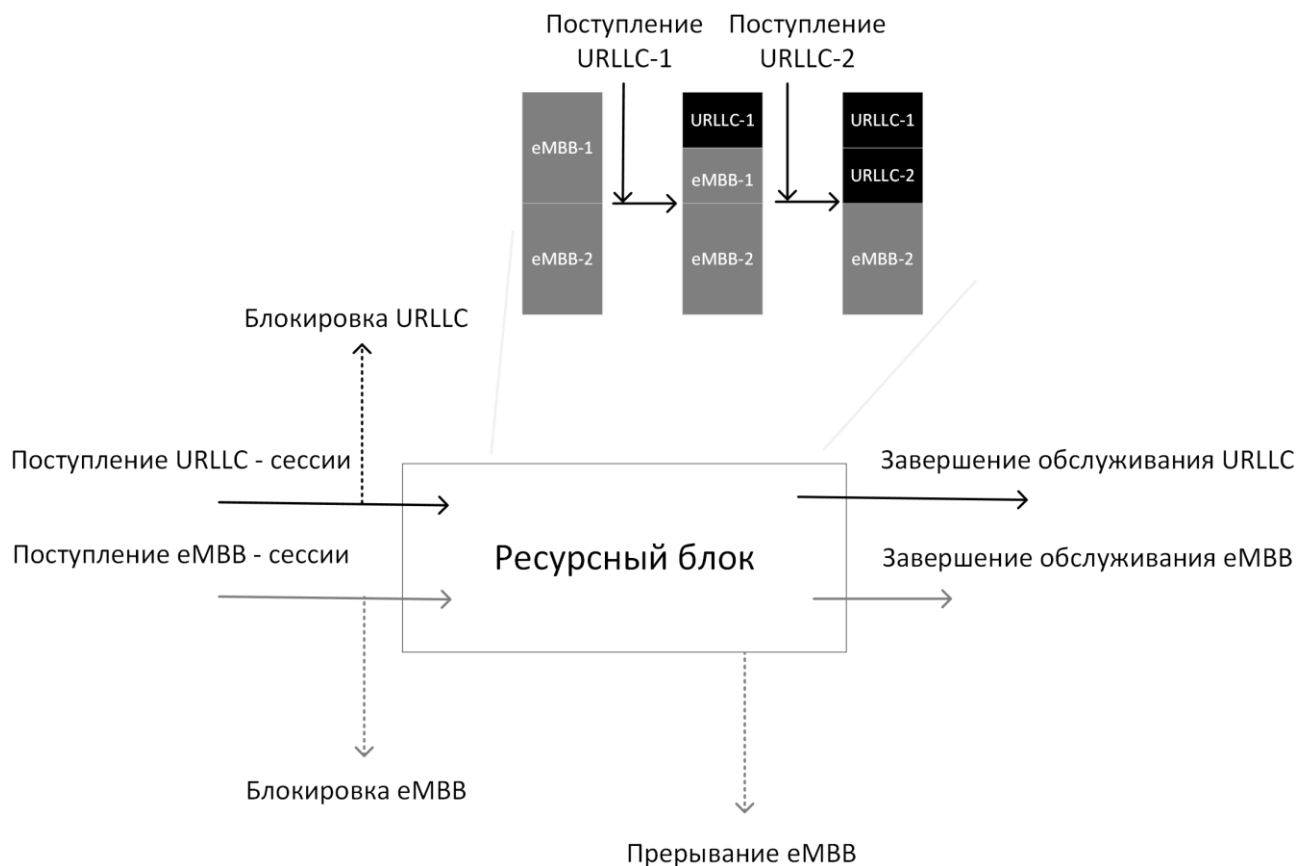


Рис. 3.1 Схема доступа модели со снижением скорости передачи

Функционирование системы описывает случайным процессом $\mathbf{X}(t)$ с состояниями $\mathbf{x} = (\mathbf{m}, n_u) = (m_1, \dots, m_K, n_u)$, где $\mathbf{m} = (m_1, \dots, m_K)$ число обслуживаемых сессий широкополосного трафика со скоростью передачи b_k , $k = \overline{1, K}$, соответственно.

Пространство состояний случайного процесса имеет вид

$$\mathcal{X} = \left\{ (\mathbf{m}, n_u) : 0 \leq n_u \leq C, m_k \geq 0, k = \overline{1, K}, \sum_{k=1}^K m_k \leq N, c(\mathbf{m}, n_u) \leq C \right\}, \quad (3.1)$$

где $c(\mathbf{m}, n_u) = n_u + \sum_{k=1}^K b_k m_k$ общая скорость передачи узкополосного и широкополосного трафика.

3.2. Политика занятия ресурса с адаптивным изменением мощности сигнала

В этой модели распределение ресурса между сессиями происходит по взвешенному циклическому алгоритму с дискриминаторным разделением кадра и без деления ресурса по частоте.

Пусть L число уровней скорости передачи данных, а b_l , $l = \overline{1, L}$ скорости передачи данных уровня l . Тогда требование к ресурсу и множество всех вариантов занятия ресурсов в случае деления ресурса по времени с учётом весовых коэффициентов, соответствующих скоростям b_l , можно представить следующим образом:

$$y_l(u_1, \dots, u_L) = \left(y_f = F, y_t = b_l / \sum_{i=1}^L b_i u_i, y_p = \frac{PL(N_0 + I_0)}{G_t G_r} \left(2^{\frac{1}{Fb_l} \sum_{i=1}^L b_i u_i} - 1 \right) \right), \quad (3.2)$$

$$u_l \geq 0, l = \overline{1, L}, \sum_{l=1}^L u_l > 0.$$

$$\mathcal{Y}(u_1, \dots, u_L) = \left\{ \begin{array}{l} \left(y_1^1, \dots, y_{u_1}^1, \dots, y_1^L, \dots, y_{u_L}^L \right) : y_f(l, i) = F, y_t(l, i) = b_l / \sum_{i=1}^L b_i u_i, \\ y_p(l, i) = \frac{PL(N_0 + I_0)}{G_t G_r} \left(2^{\frac{1}{F b_l} \sum_{j=1}^L b_j u_j} - 1 \right) \leq P, \\ i = \overline{1, u_l}, l = \overline{1, L}, PL > 0 \end{array} \right\}, \quad (3.3)$$

$$u_l \geq 0, l = \overline{1, L}, \sum_{l=1}^L u_l > 0.$$

Перейдя к рассматриваемой модели, где $d=1$ скорость передачи сессий узкополосного трафика, b_k скорость передачи широкополосного трафика уровня $k = \overline{1, K}$, тогда из (3.2) и (3.3) требования к ресурсу для сессий узкополосного и широкополосного трафика и множество всех вариантов занятия ресурса имеют следующий вид соответственно:

$$\mathbf{y}^u(\mathbf{x}) = \left(y_f^u = F, y_t^u = \frac{1}{c(\mathbf{x})}, y_p^u = P \right), \mathbf{x} \in \mathcal{X} \setminus \{\mathbf{0}\}, \quad (3.4)$$

$$\mathbf{y}^m(\mathbf{x}) = \left(y_f^m = F, y_t^m = \frac{b_k}{c(\mathbf{x})}, y_p^m = \frac{PL(N_0 + I_0)}{G_t G_r} \left[2^{\frac{c(\mathbf{x})}{F b_k}} - 1 \right] \right), \mathbf{x} \in \mathcal{X} \setminus \{\mathbf{0}\}, \quad (3.5)$$

$$\mathcal{Y}(\mathbf{x}) = \left\{ \begin{array}{l} \left(y_{11}^m, \dots, y_{1m_1}^m, \dots, y_{K1}^m, \dots, y_{Km_K}^m, y_{n_u}^u, \dots, y_{n_u}^u \right) : \\ y_f^u(i) = F, y_t^u(i) = \frac{1}{c(\mathbf{x})}, y_p^u(i) = P, \quad i = \overline{1, n_u}; \\ y_f^m(k, j) = F, y_t^m(k, j) = \frac{b_k}{c(\mathbf{x})}, \\ y_p^m(k, j) = \frac{PL_j^m(N_0 + I_0)}{G_t G_r} \left[2^{\frac{c(\mathbf{x})}{F b_k}} - 1 \right] \leq P, \\ j = \overline{1, m_k}, k = \overline{1, K}, PL_j^m \geq 1 \end{array} \right\}, \mathbf{x} \in \mathcal{X} \setminus \{\mathbf{0}\},$$

$$\mathcal{Y}(\mathbf{0}) = \{(0, 0, 0)\}, \quad (3.6)$$

$$\mathcal{Y}(\mathbf{x}) = \emptyset, \quad \mathbf{x} \notin \mathcal{X}.$$

3.3. Условное распределение вероятностей занятости ресурса

В данной модели принятие новых запросов также зависит от занятости ресурса, как и в модели, описанной в разделе 2.3. Формулы для расчета условных вероятностей принятия новых запросов начать обслуживание широкополосного и узкополосного трафика имеют вид согласно лемме 3.1 и утверждению 3.1, представленных ниже.

Утверждение 3.1. Если требования к ресурсу для сессий узкополосного и широкополосного трафика имеют вид (3.4) и (3.5) соответственно и множество всех вариантов занятия ресурса (3.6), тогда вероятность того, что сессии узкополосного и широкополосного трафика обслуживаются суммарно со скоростью $c(\mathbf{x}) = n_u + \sum_{k=1}^K b_k m_k$, равна

$$A(\mathbf{x}) = \left[F_{\xi_{PL}} \left(\frac{PG_t G_r}{N_0 + I_0} \left(2^{\frac{c(\mathbf{x})}{F b_k}} - 1 \right) \right)^{\sum_{k=1}^K m_k} \right], \quad \mathbf{x} \in \mathcal{X}. \quad (3.7)$$

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

Доказательство. Вероятность того, что $\mathbf{x} = (m_1, \dots, m_K, n_u)$, $\mathbf{x} \in \mathcal{X}$ сессии узкополосного и широкополосного трафика обслуживаются суммарно со скоростью $c(\mathbf{x}) = n_u + \sum_{k=1}^K b_k m_k$ в системе, равна вероятности, что общая мощность передачи не должна превышать максимума P , тогда искомая вероятность может быть записана в виде

$$\begin{aligned}
 A(\mathbf{x}) &= P\left\{\left(y_{11}^m, \dots, y_{1m_1}^m, \dots, y_{K1}^m, \dots, y_{Km_K}^m, y_1^u, \dots, y_{n_u}^u\right) \in \mathcal{Y}(\mathbf{x})\right\} = \\
 &= P\left\{y_p^m(k, j) = \frac{PL(N_0 + I_0)}{G_t G_r} \left[2^{\frac{c(\mathbf{x})}{Fb_k}} - 1\right] \leq P, \quad j = \overline{1, m_k}, \quad k = \overline{1, K}\right\} = \\
 &= \left[\frac{PL(N_0 + I_0)}{G_t G_r} \left[2^{\frac{c(\mathbf{x})}{Fb_k}} - 1\right] \leq P\right]^{\sum_{k=1}^K m_k} = \left[P\left\{PL \geq \frac{PG_t G_r}{N_0 + I_0} \left(2^{\frac{c(\mathbf{x})}{Fb_k}} - 1\right)^{-1}\right\}\right]^{\sum_{k=1}^K m_k},
 \end{aligned}$$

$\mathbf{x} \in \mathcal{X}$

Так как мощность затухания сигнала PL является случайной величиной согласно модели затухания сигнала, тогда $P\{\xi_{PL} \leq x\}$ является функцией распределения СВ $F_{\xi_{PL}}(x)$ по определению и получаем (3.7).

Утверждение доказано. $\square$

Лемма 3.1. Если модель ресурса имеет вид согласно утверждению 3.1, тогда вероятности принятия новых сессий узкополосного и широкополосного трафика, соответственно, при условии того, что сессии узкополосного и широкополосного трафика уже обслуживаются суммарно со скоростью $c(\mathbf{x})$, вычисляются по следующим формулам

$$\begin{aligned}
 p_u(\mathbf{x}) &= \left[F_{\xi_{PL}}\left(\frac{B}{2^{\frac{c(\mathbf{x} + \mathbf{e}_{K+1})}{Fb_k}} - 1}\right)\right]^{\sum_{k=1}^K m_k} \left[\left(F_{\xi_{PL}}\left(\frac{B}{2^{\frac{c(\mathbf{x})}{Fb_k}} - 1}\right)\right)^{\sum_{k=1}^K m_k}\right]^{-1}, \\
 p_m(\mathbf{x}) &= \left[F_{\xi_{PL}}\left(\frac{B}{2^{\frac{c(\mathbf{x} + \mathbf{e}_1)}{Fb_k}} - 1}\right)\right]^{\sum_{k=1}^K m_k + 1} \left[\left(F_{\xi_{PL}}\left(\frac{B}{2^{\frac{c(\mathbf{x})}{Fb_k}} - 1}\right)\right)^{\sum_{k=1}^K m_k}\right]^{-1},
 \end{aligned}$$

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

Доказательство. Условные вероятности принятия новых сессий узкополосного и широкополосного трафика $p_u(x)$ и $p_m(x)$ соответствуют тому, что число обслуживающих сессий узкополосного трафика станет $n_u + 1$, т.е. будет состояние $(m_1, \dots, m_K, n_u + 1)$ и число обслуживающихся сессий широкополосного трафика -- $m_k + 1$, т.е. будет состояние $(m_1 + 1, \dots, m_K, n_u)$. Введем единичный вектор e_k с единицей на k -ом месте, где $k = \overline{1, K+1}$. Тогда условные вероятности принятия новых сессий узкополосного и широкополосного трафика, когда в системе уже обслуживается x сессий, имеют вид

$$p_u(x) = \frac{A(x + e_{K+1})}{A(x)},$$

$$p_m(x) = \frac{A(x + e_1)}{A(x)}.$$

Записав данные вероятности согласно утверждению 3.1, получим искомые формулы для расчета условных вероятностей.

Лемма доказана. $\square$

Таким образом, с учетом зависимого занятия ресурсов элементы матрицы переходов для произвольного состояния $(m, n_u) \in \mathcal{X}$ имеют вид:

$$\begin{aligned} a(m, n_u)(m, n_u + 1) &= \lambda_u p_u(x), & c(m, n_u) + 1 &\leq C, \\ a(m, n_u)(m - e_k + e_{k+1}, n_u + 1) &= \lambda_u p_u(x), & c(m, n_u) + 1 &> C, m_k > 0, \\ & & \sum_{i=1}^{k-1} m_i &= 0, k = \overline{1, K-1}, \\ a(m, n_u)(m - e_K, n_u + 1) &= \lambda_u p_u(x), & c(m, n_u) + 1 &> C, m_k > 0, \sum_{k=1}^{K-1} m_k = 0, \\ a(m, n_u)(m + e_K, n_u) &= \lambda_m p_m(x), & c(m, n_u) + b_1 &\leq C, \\ a(m, n_u)(m - e_k + e_{k-1}, n_u - 1) &= n_u \mu_u, & n_u &> 0, \sum_{i=k+1}^K m_i = 0, m_k > 0, k = \overline{2, K}; \\ a(m, n_u)(m, n_u - 1) &= n_u \mu_u, & n_u &> 0, \sum_{k=2}^K m_k = 0, \\ a(m, n_u)(m - e_K, n_u) &= m_k \mu_m, & m_k &> 0, k = \overline{1, K}. \end{aligned}$$

где e_k единичный вектор с 1 на k -ом месте.

Зная стационарные распределения $\pi(\mathbf{m}, n_u)$ и условные вероятности принятия новых сессий $p_u(\mathbf{m}, n_u)$ и $p_m(\mathbf{m}, n_u)$, $(\mathbf{m}, n_u) \in \mathcal{X}$ можно рассчитать следующие показатели эффективности передачи широкополосного трафика:

1. Вероятность прерывания обслуживания:

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

2. Вероятность блокировки нового запроса:

$$p_m^{\text{bl}} = \sum_{(\mathbf{m}, n_u) \in \mathcal{B}} \pi(\mathbf{m}, n_u) (1 - p_m(\mathbf{m}, n_u)),$$

$$\mathcal{B} = \{(\mathbf{m}, n_u) \in \mathcal{X} : c(\mathbf{m}, n_u) + b_1 > C\}.$$

3. Среднее число обслуживаемых сессий со скоростью передачи b_k :

$$\overline{n_{m,k}} = \sum_{(\mathbf{m}, n_u) \in \mathcal{X}} m_k \pi(\mathbf{m}, n_u), \quad k = \overline{1, K}.$$

4. Среднее общее число обслуживаемых сессий:

$$\overline{n_m} = \sum_{k=1}^K \overline{n_{m,k}}.$$

5. Средняя скорость передачи широкополосного трафика:

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

6. Вероятность снижения скорости передачи широкополосного трафика:

$$p^{\text{dg}} = \sum_{k=1}^{K-1} \sum_{m_k=1}^N \frac{1}{m_k} \frac{\lambda_u}{\lambda_u + n_u \mu_u + \mu_m \sum_{i=k}^K m_i \pi \left(0, \dots, 0, m_k, \dots, m_K, C - \sum_{i=k}^K b_i m_i \right)}.$$

3.4. Численный анализ показателей эффективности передачи широкополосного трафика

Скорость передачи данных в беспроводных сетях может снижаться из-за затухания сигнала, что приводит к уменьшению его мощности. Поэтому при планировании передачи данных необходимо учитывать эти факторы. Для модели со снижением скорости передачи широкополосного трафика по уровням скорости, когда все передающие устройства находятся в зоне прямой видимости, оценим влияние моделей затухания сигнала в сценариях UMa и UMi. Для этого проведем численный анализ показателей эффективности передачи широкополосного трафика, таких как вероятность прерывания обслуживания и средняя скорость передачи [101].

В рамках численного анализа рассмотрим канал с полосой пропускания $B = 1,4$ МГц, и пропускной способностью $C = 42$. Максимальная скорость передачи широкополосного трафика составляет $b_1 = 7$, тогда максимальное число одновременно обслуживаемых сессий широкополосного трафика $N = 6$. Интенсивность входящего потока сессий широкополосного трафика составляет $\lambda_m = 1$ запросов в секунду, а сессий узкополосного трафика в $i = 1,10^5$ раз чаще $\lambda_u = i\lambda_m$ запросов в секунду. В случае занятости канала при поступлении нового запроса начать обслуживание узкополосного трафика, скорость передачи уже обслуживаемой сессии широкополосного трафика может быть уменьшена на 1 Мбит/с, пока она не достигнет минимальной скорости $b_K = 5$. Скорость передачи узкополосного трафика постоянна и равна $d = 1$. Средняя длительность сессии широкополосного трафика составляет 60 с. ($\mu_m = 60^{-1}$), а сессии узкополосного — 1 мс, т.е. 0.001 с. ($\mu_u = 1000$). Остальные исходные данные показаны в Табл. 3.1.

Табл. 3.1 Параметры для численного анализа

Параметр	Описание	Значение	
		UMa	UMi
B	Пропускная способность	1.4 МГц	1.4 МГц
f_c	Несущая частота	1 ГГц	1 ГГц
$D(d)$	3D расстояние между БС и ПУ	35 м	10 м
R	Радиус действия БС	5 000 м	5 000 м
N_0	Коэффициент шума	9 дБ	9 дБ
I_0	Коэффициент интерференции	-	-
F	Доступная полоса пропускания частот	6 ГГц	6 ГГц
P	Максимальная мощность передаваемого сигнала	49 дБм	44 дБм
α	Коэффициент затухания сигнала	3	3.19
β	Коэффициент затухания сигнала	3.24	3.24

Результаты расчётов представлены на графиках, показанных на Рис. 3.2 - Рис. 3.5. График вероятности прерывания обслуживания для широкополосного трафика в сценариях UMa и UMi демонстрирует, что чем чаще поступают запросы узкополосного трафика, тем выше вероятность прерывания

обслуживания широкополосного трафика (Рис. 3.2). Однако разница между этими сценариями незначительна, что видно на графике на Рис. 3.3. Неоднозначное поведение графика вероятности прерывания обслуживания, где он сначала возрастает, а затем убывает, объясняется тем, что сначала число обслуживаемых сессий широкополосного трафика в системе увеличивается, а затем уменьшается из-за того, что запросы узкополосного трафика поступают в систему гораздо чаще. Это приводит к тому, что новые запросы широкополосного трафика не могут быть приняты из-за перегрузки системы.

График средней скорости передачи данных широкополосного трафика, показанный на Рис. 3.4, отражает, что она уменьшается при увеличении интенсивности поступления запросов узкополосного трафика. Разница между двумя сценариями также незначительна и отражена на графике, изображенного на Рис. 3.5. Однако, стоит отметить, что средняя скорость передачи широкополосного трафика довольно высока и близка к максимально возможной (равной 7) несмотря на то, что запросы узкополосного трафика поступают часто, до 10^5 запросов в секунду.

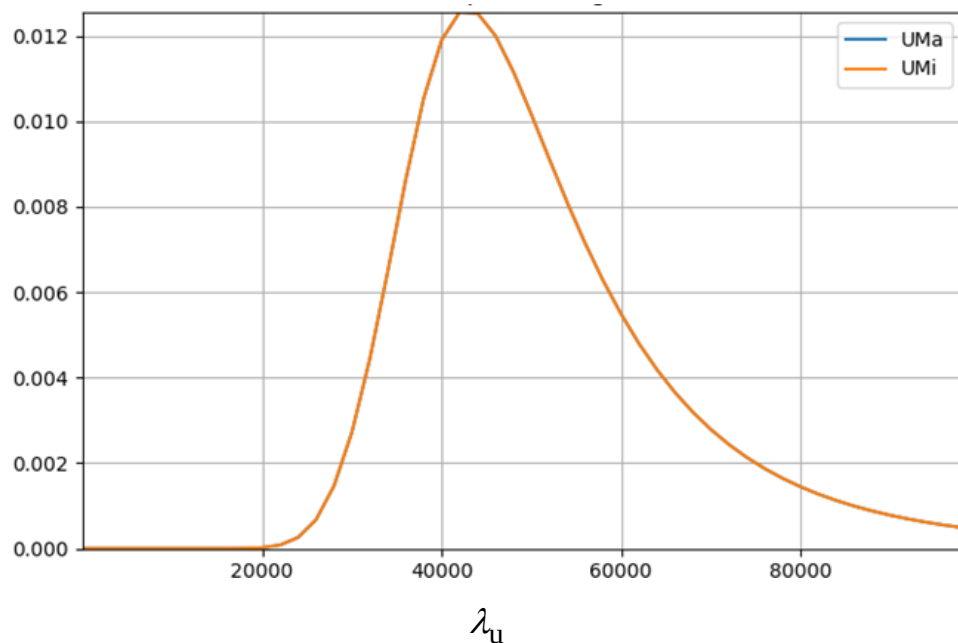


Рис. 3.2 Модель со снижением скорости передачи: Вероятность прерывания обслуживания широкополосного трафика с учетом модели затухания сигнала для сценариев UMa и UMi: абсолютные значения

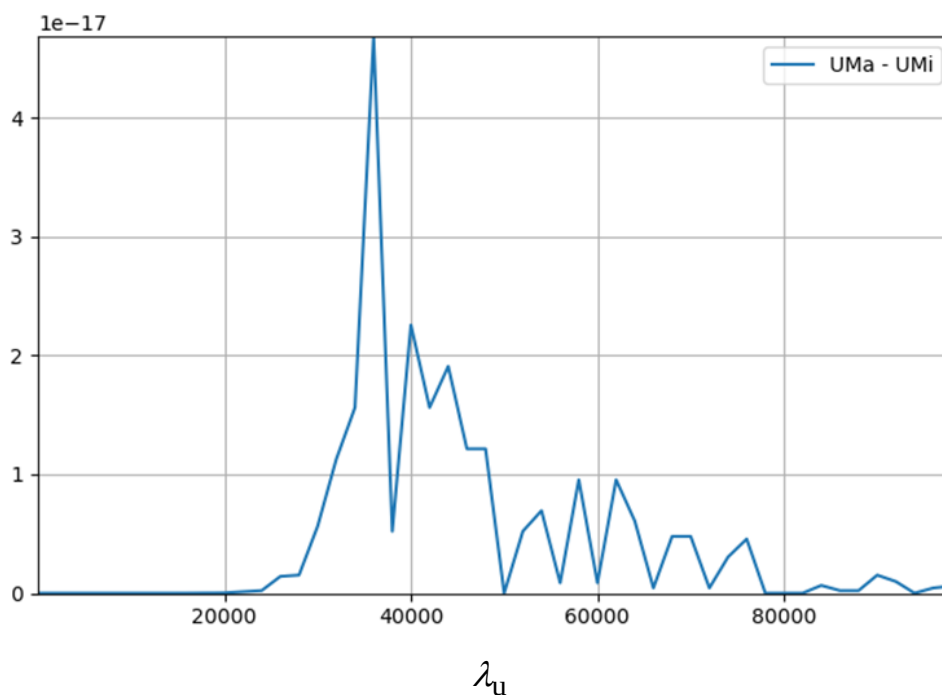


Рис. 3.3 Модель со снижением скорости передачи: Вероятность прерывания обслуживания широкополосного трафика с учетом модели затухания сигнала для сценариев UMa и UMi: разность значения

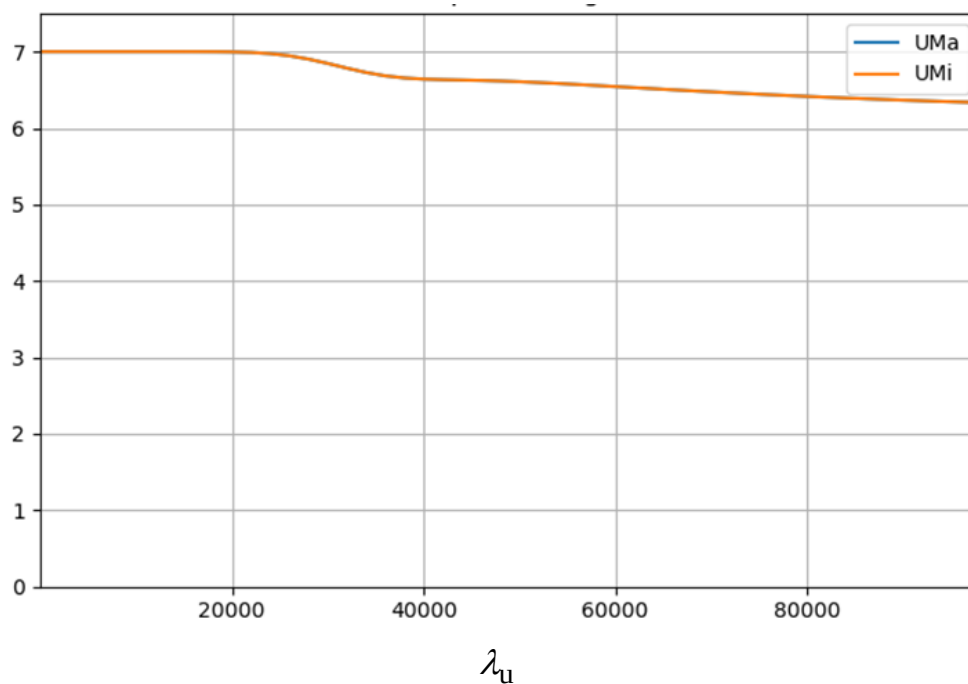


Рис. 3.4 Модель со снижением скорости передачи: Средняя скорость передачи широкополосного трафика с учетом модели затухания сигнала для сценариев UMa и UMi: абсолютные значения

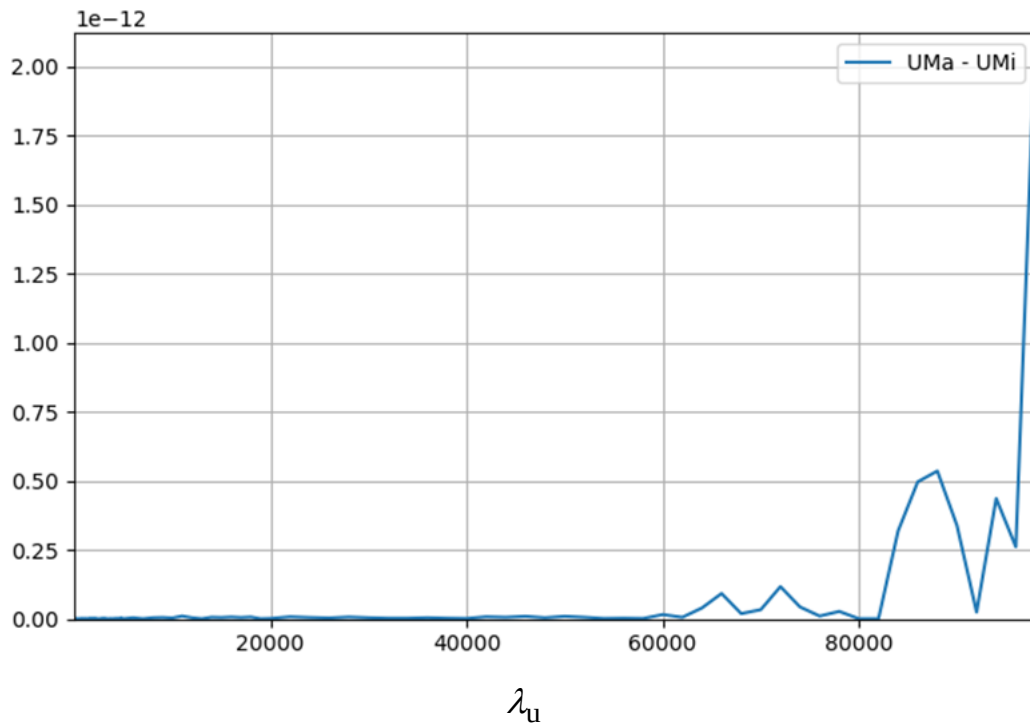


Рис. 3.5 Модель со снижением скорости передачи: Средняя скорость передачи широкополосного трафика с учетом модели затухания сигнала для сценариев UMa и UMi: разность значений

3.5. Задача выбора уровней скорости широкополосного трафика

Качество обслуживания широкополосного интернета зависит не только от скорости передачи данных, но и от вероятностей прерывания обслуживания и блокировки. Поэтому для эффективной передачи данных недостаточно иметь только высокую скорость передачи.

В этом разделе представлено численное решение задачи по выбору уровней скорости передачи широкополосного трафика с учётом ограничений на вероятности прерывания обслуживания и блокировки, а также с учётом минимальной скорости передачи, для выбранного набора исходных данных [102]. Таким образом, задача выбора уровней скорости передачи широкополосного трафика может быть определена как задача максимизации средней скорости передачи широкополосного трафика, при ограничениях на качество обслуживания

широкополосного трафика, в виде порогов на вероятности блокировки P_m^{bl} и прерывания обслуживания P^{in} и порога на минимальную скорость передачи $\hat{b}$ при заданном наборе скоростей $\mathcal{D} = \{d_1, \dots, d_K\}$. Получить рекомендуемый набор значений скорости передачи широкополосного трафика можно с помощью численного решения задачи максимизации

$$\begin{aligned} (K^*, \mathbf{b}^*) &= \arg \max_{K, \mathbf{b}} (K, \mathbf{b}), \\ b_k &\in \mathcal{D} = \{d_1, \dots, d_K\}, k = \overline{1, K}, \\ b_1 &> \dots > b_K \geq \hat{b}, \\ P_m^{bl}(K, \mathbf{b}) &\leq P_m^{bl} \\ P^{in}(K, \mathbf{b}) &\leq P^{in}. \end{aligned} \tag{3.8}$$

Для получения такого решения был проведен численный анализ модели в два этапа: сначала исследуется влияние интенсивности поступления запросов узкополосного трафика на значения вероятностей блокировки и прерывания обслуживания широкополосного трафика, затем исследуются требуемые показатели эффективности для разных наборов скоростей передачи и определяется численное решение требуемой задачи выбора уровней скоростей передачи широкополосного трафика.

Примем следующие предположения и исходные данные: пропускная способность канала равна 42, рекомендуемая, минимальная, скорость широкополосного трафика составляет 5. Запросы узкополосного трафика поступают в n раз быстрее широкополосного, $\lambda_u = n\lambda_m$, а средняя длительность сессий узкополосного и широкополосного трафика соответственно равны $\mu_u^{-1} = 1$ мс и $\mu_m^{-1} = 120$ с.

На первом этапе рассмотрим один набор уровней скорости передачи $\mathbf{b} = (6, 5, 4)$ и 3 значения интенсивности поступления запросов широкополосного трафика $\lambda_m = 0.4, 0.6, 0.8$. Полученные результаты показаны на графиках Рис. 3.6

- Рис. 3.8. Согласно Рис. 3.6, при увеличении интенсивности поступления запросов узкополосного трафика средняя скорость широкополосного трафика снижается, однако вероятности блокировки и прерывания обслуживания широкополосного трафика меняют свой характер поведения в зависимости от n , как показано на Рис. 3.7 и Рис. 3.8.

При $n < 3000$ вероятность блокировки снижается, а вероятность прерывания обслуживания увеличивается. Это означает, что запросы широкополосного трафика будут приниматься к обслуживанию, но с большей частотой будут прерываться.

При $n > 3000$ вероятность блокировки возрастает, а вероятность прерывания обслуживания убывает. Это означает, что широкополосный трафик с большей вероятностью будет заблокирован до того, как начнётся его обслуживание.

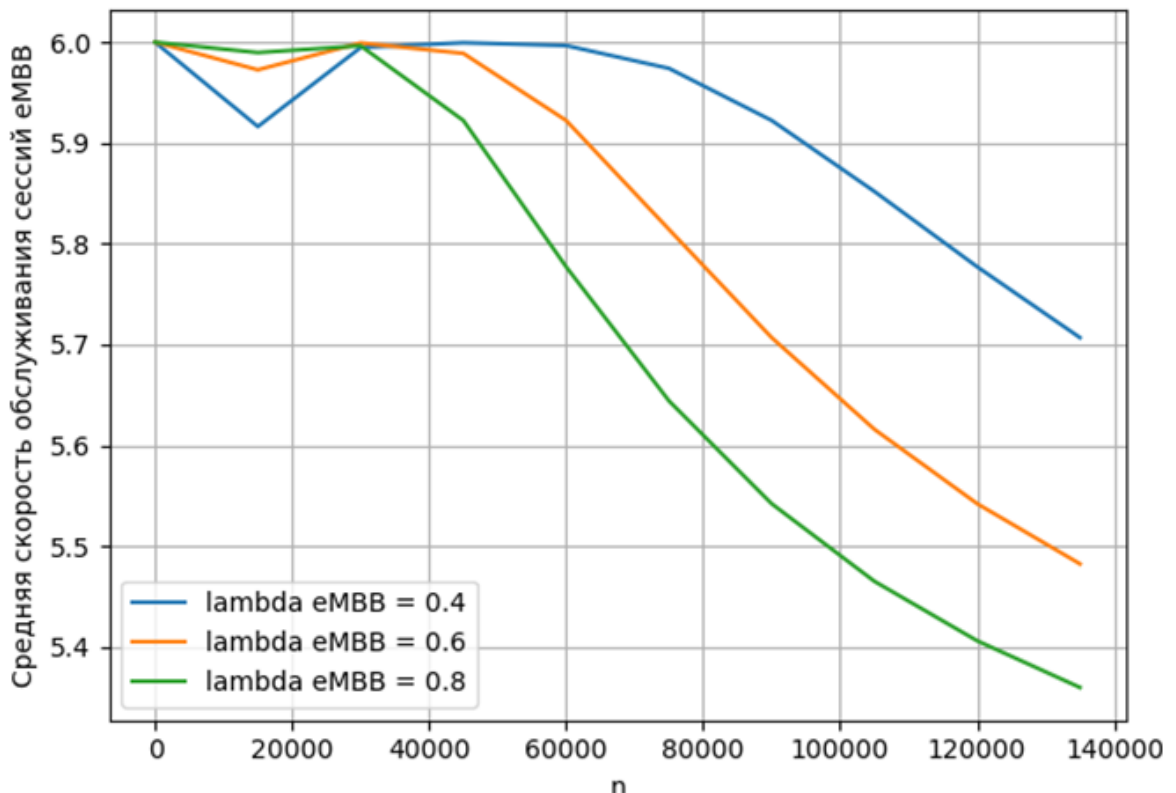


Рис. 3.6 Модель со снижением скорости передачи: Средняя скорость передачи широкополосного трафика для $\mathbf{b} = (6, 5, 4)$

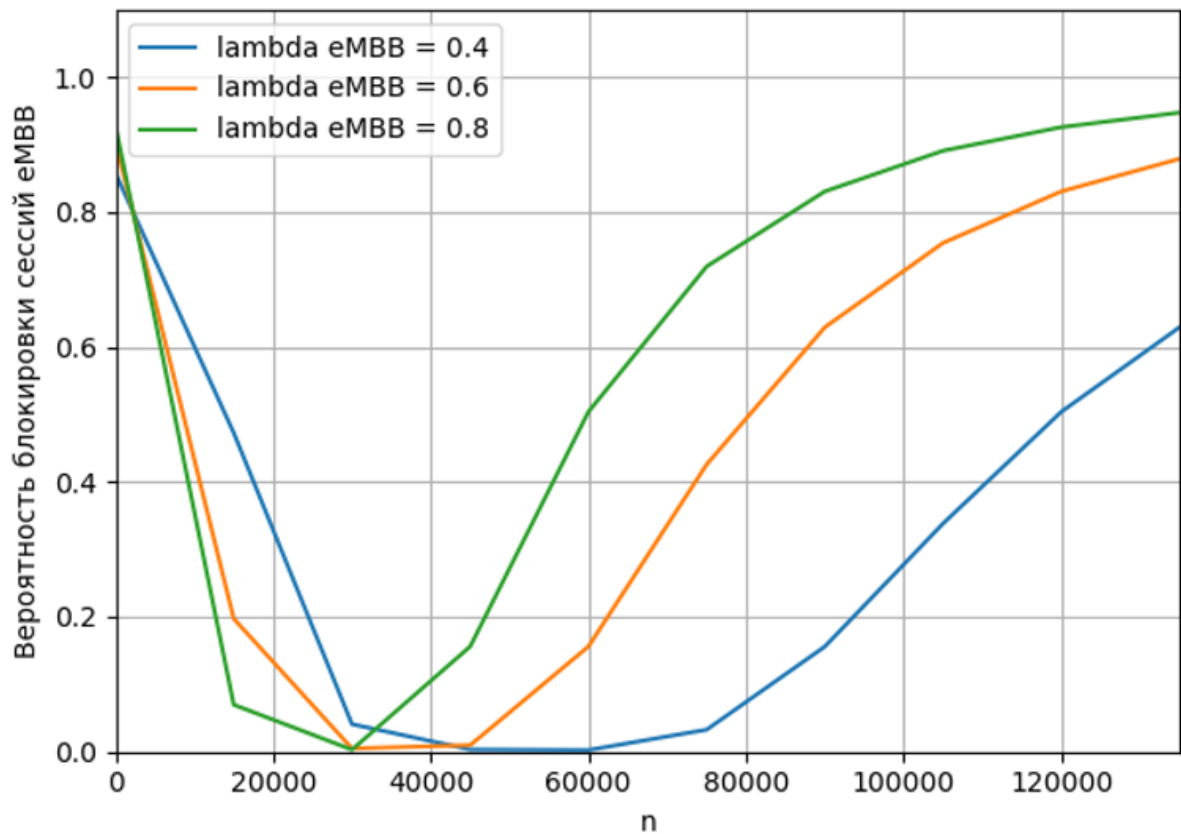


Рис. 3.7 Модель со снижением скорости передачи: Вероятность блокировки широкополосного трафика для $\mathbf{b} = (6, 5, 4)$

Максимальная средняя скорость передачи широкополосного трафика наблюдается при интенсивности поступления его запросов $\lambda_m = 0.4$. При этом вероятности блокировки и прерывания обслуживания минимальны. Например, если, предположить, что вероятность блокировки должна быть меньше 0.2, а вероятность прерывания обслуживания меньше $0.6 \cdot 10^{-5}$, то только один интервал значения n будет удовлетворять ограничениям, а именно $6\,000 < n < 9\,000$.

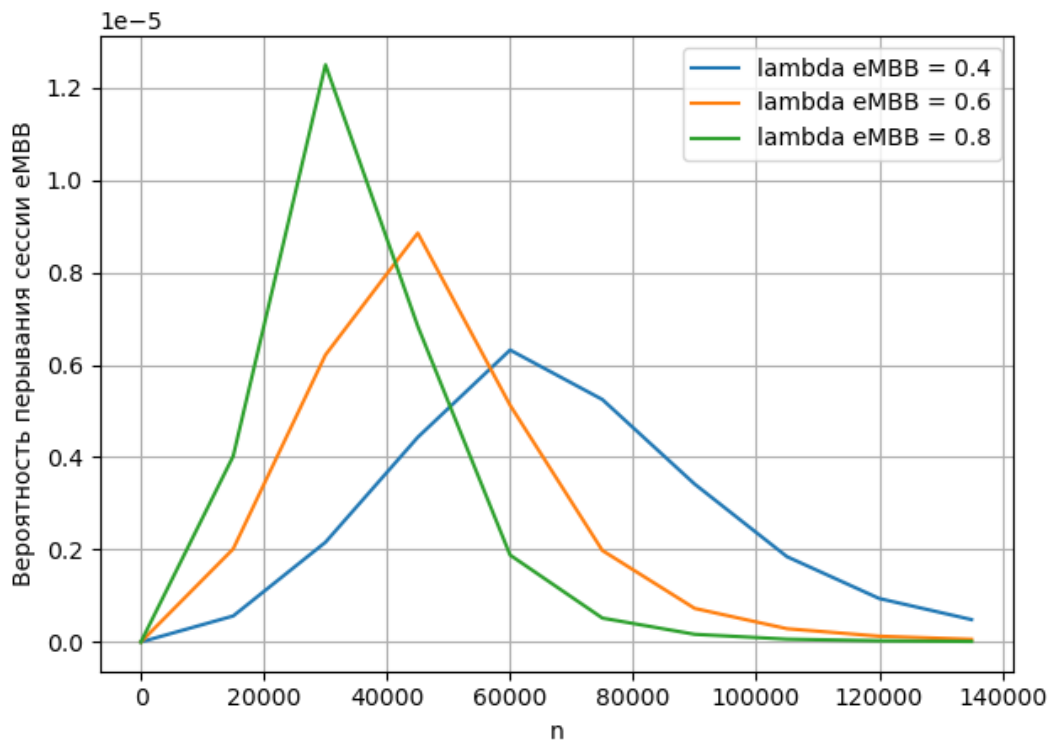


Рис. 3.8 Модель со снижением скорости передачи: Вероятность прерывания обслуживания широкополосного трафика для $\mathbf{b} = (6, 5, 4)$

В рамках второго сценария полагаем интенсивность поступления запросов равной $\lambda_m = 0.4$ и число уровней скорости передачи широкополосного трафика $K = 3$, тогда все возможные варианты наборов уровней скорости можно записать в виде:

$$(K; \mathbf{b}) : (3; 6, 5, 4), (2; 6, 5), (2; 6, 4), (2; 5, 4), (1; 6), (1; 5), (1; 4).$$

Полученные результаты показаны на Рис. 3.9 - Рис. 3.11. Согласно Рис. 3.9, максимальная средняя скорость передачи наблюдается при наборе скоростей $(1; 6)$, однако для данного набора вероятность прерывания обслуживания является максимальной, Рис. 3.11. Поэтому выбор набора уровней скорости будет определяться различными ограничениями на вероятность блокировки P_m^{bl} и прерывания обслуживания P^{in} широкополосного трафика. Ниже рассмотрим примеры таких ограничений и соответствующие им численные решения.

1. Если ограничения на вероятности $P_m^{bl} \leq 0.1$ и $P^{in} \leq 3 \cdot 10^{-6}$, то:

1.1. при $10\,000 < n < 20\,000$ для выбранных ограничениях подходят наборы $(2; 5, 4)$, $(2; 6, 5)$, $(2; 6, 4)$, $(1; 4)$, однако максимальная скорость достигается при наборах $(2; 6, 5)$ и $(2; 6, 4)$,

1.2. при $20\,000 < n < 90\,000$ подходящего набора не наблюдается,

1.3. при $90\,000 < n < 100\,000$ для выбранных ограничениях подходят наборы $(1; 6)$, $(1; 5)$, а при наборе $(1; 6)$ достигается максимальная средняя скорость передачи.

2. Если ограничения на вероятности $P_m^{bl} \leq 0,2$ и $P^{in} \leq 2 \cdot 10^{-6}$, то:

2.1. при $10\,000 < n < 20\,000$ для выбранных ограничений подходит набор $(2; 5, 4)$,

2.2. при $n > 100\,000$ для выбранных ограничений подходят наборы $(1; 6)$, $(1; 5)$, $(1; 4)$, а при наборе $(1; 6)$ достигается максимальная средняя скорость передачи.

3. Если ограничения на вероятности $P_m^{bl} \leq 0,2$ и $P^{in} \leq 4 \cdot 10^{-6}$, то:

3.1. при $80\,000 < n < 100\,000$ для выбранных ограничений подходят все наборы кроме одного $(3; 6, 5, 4)$, а максимальная средняя скорость передачи достигается при наборах $(2; 6, 5)$ и $(1; 6)$,

3.2. при $100\,000 < n < 120\,000$ для выбранных ограничений подходят наборы $(1; 6)$, $(1; 5)$, $(1; 4)$, и при наборе $(1; 6)$ достигается максимальная средняя скорость передачи.

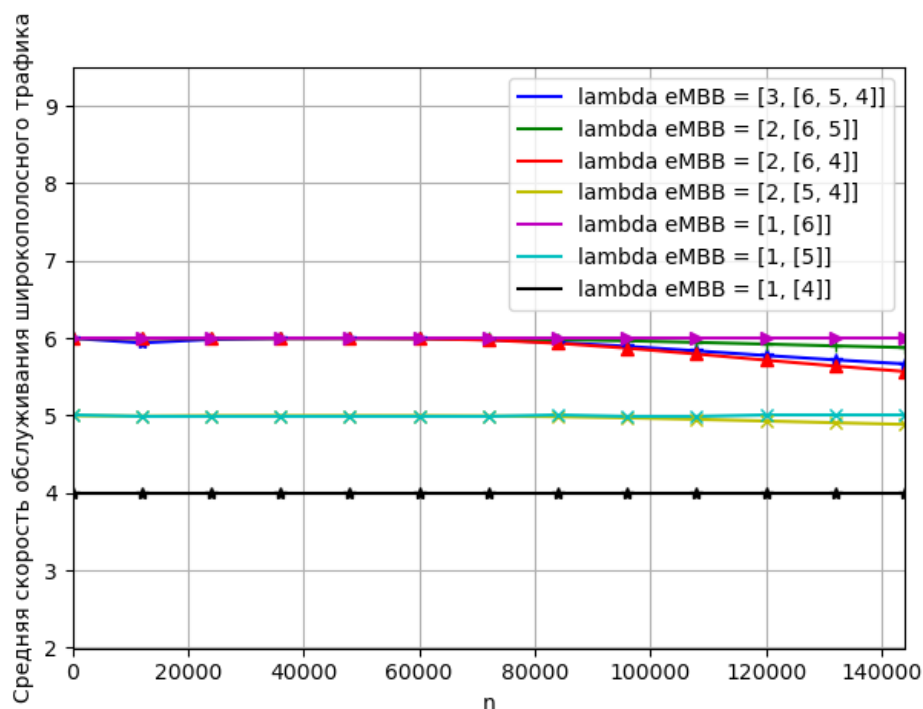


Рис. 3.9 Модель со снижением скорости передачи: Средняя скорость передачи широкополосного трафика для разных наборов уровней

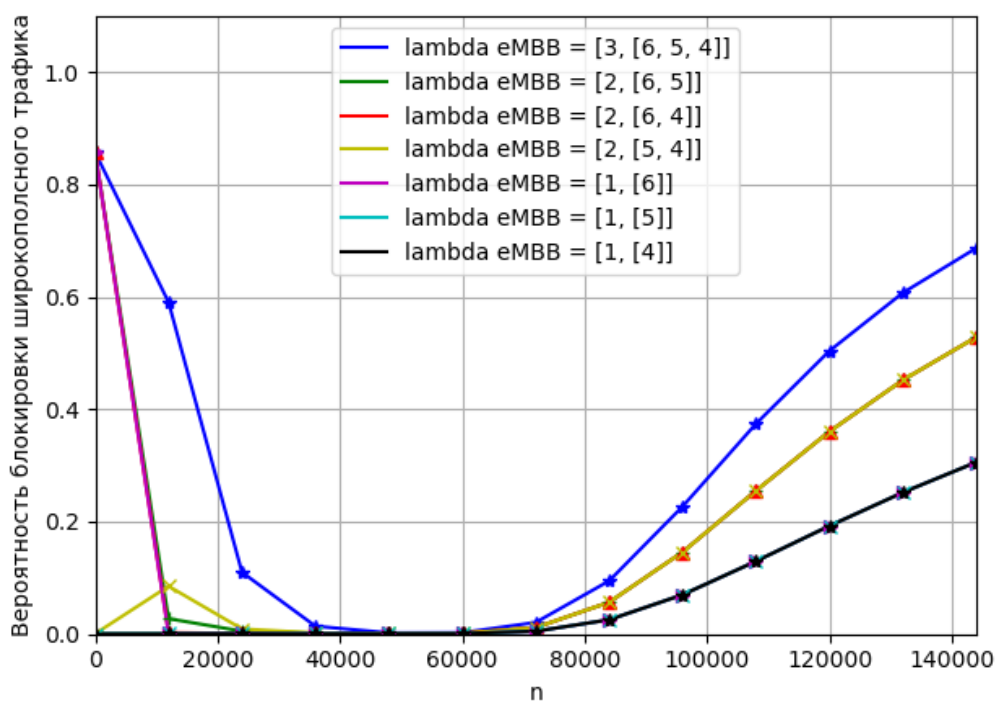


Рис. 3.10 Модель со снижением скорости передачи: Вероятность блокировки широкополосного трафика для разных наборов уровней

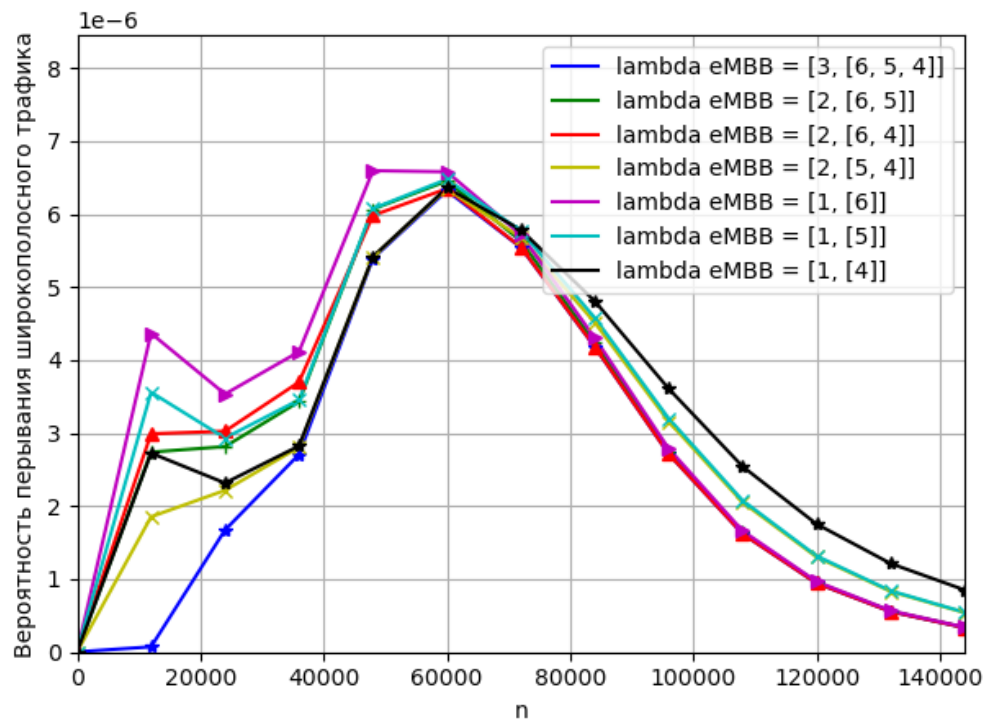


Рис. 3.11 Модель со снижением скорости передачи: Вероятность прерывания обслуживания широкополосного трафика для разных наборов уровней

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение сформулируем основные результаты диссертационной работы.

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 ОБОЗНАЧЕНИЙ

C	- пропускная способность
b	- скорость передачи широкополосного трафика
N	- максимальное число одновременно обслуживаемых сессий широкополосного трафика
b_k	- скорость передачи широкополосного трафика k -ого уровня
K	- число уровней скоростей передачи широкополосного трафика
C_1	- максимальное число задержанных запросов широкополосного трафика
C_2	- максимальное число прерванных сессий широкополосного трафика
R	- радиуса покрытия базовой станции
F	- полоса частот базовой станции
T	- длина кадра
P	- максимальная мощность передаваемого сигнала
G_t, G_r	- коэффициенты усиления передающей и приемной антенн соответственно
N_0	- мощность шума
I_0	- мощность интерференции
PL	- мощность затухания сигнала
α, β	- коэффициенты модели мощности затухания сигнала
h_{BS}	- высота базовой станции
h_{UT}	- высота пользовательского устройства
f_c	- несущая частота
d	- расстояние от пользовательского устройства до базовой станции
$D(d)$	- расстояние от пользовательского устройства до базовой станции в трехмерном пространстве
y	- модель требований к ресурсу
$y(u)$	- множество вариантов занятия ресурсов для $u > 0$ сессий

- $X(t)$ - случайный процесс
- x - состояние системы массового обслуживания
- $\pi(x)$ - стационарные вероятности состояний системы массового обслуживания
- $p(x)$ условная вероятность принятия новых сессий на обслуживание, при условии, что x сессий уже обслуживается
- n_m, n_u - число обслуживаемых сессий широкополосного / узкополосного трафика
- q_1 - число задержанных запросов широкополосного трафика
- q_2 - число попыток прерванных сессий широкополосного трафика
- m_k - число обслуживаемых сессий широкополосного трафика со скоростью передачи k -ого уровня
- λ_m, λ_u - интенсивность входящего потока запросов широкополосного / узкополосного трафика
- μ_m, μ_u - интенсивность потока обслуживания сессий широкополосного / узкополосного трафика
- γ_1 - интенсивность потока повторных запросов широкополосного трафика начать обслуживание
- γ_2 - интенсивность потока повторных попыток прерванных сессий широкополосного трафика возобновить обслуживание

ЛИТЕРАТУРА

1. Fuentes M., Carcel J.L., Dietrich C. Yu L., Garro E., Pauli V., Lazarakis F.I.; Grondalen O., Bulakci O., Yu J. 5G New Radio Evaluation against IMT-2020 Key Performance Indicators // IEEE Access. – 2020. – 8. – P.110880–110896.
2. Молчанов Д.А., Бегишев В.О., Самуйлов К.Е., Кучерявый Е.А. Сети 5G/6G: архитектура, технологии, методы анализа и расчета // Москва: Российский университет дружбы народов. – 2022. – С. 515.
3. 3GPP TS 23.501. 5G; System Architecture for the 5G System, 2018. V15.2.0. Release 15.
4. Varsier N., Dufrene L.A., Dumay M., Lampin Q., Schwoerer J.A. 5G New Radio for Balanced and Mixed IoT Use Cases: Challenges and Key Enablers in FR1 Band // IEEE Communications Magazine. – 2021. – 59. – P. 82–87.
5. Khan B.S., Jangsher S., Ahmed A., Al-Dweik A. URLLC and eMBB in 5G Industrial IoT: A Survey // IEEE Open Journal of the Communications Society. – 2022. – 3. – P.1134–1163.
6. ITU-R. IMT Vision – Framework and Overall Objectives of the Future Development of IMT for 2020 and Beyond. Recommendation ITU-R M.2083-0, September 2015.
7. Osama M., Ateya A., Ahmed Elsaid S., Muthanna, A. Ultra-Reliable Low-Latency Communications: Unmanned Aerial Vehicles Assisted Systems // Information. – 2022. – 13(9). – 430.
8. Paramonov A., Peng J., Kashkarov D., Muthanna A., Elgendy I., Koucheryavy A., Maleh Y., Abd El-Latif A. Study and Analysis of Multiconnectivity for Ultrareliable and Low-Latency Features in Networks and V2X Communications // Wireless Communications and Mobile Computing. – 2021. – 1. P.1-10.
9. Kochetkov D., Almaganbetov M. Using Patent Landscapes for Technology Benchmarking: A Case of 5G Networks. // Advances in Systems Science and Applications. – 2021. – 21. – P. 20–28.

10. Kochetkov D., Vuković D., Sadekov N., Levkiv H. Smart Cities and 5G Networks: An Emerging Technological Area? // Journal of the Geographical Institute Jovan Cvijic SASA. – 2019. – 69. – P.289–295.
11. Кочетков, Д. М., Кочеткова И.А., Макеева Е.Д. Влияние технологий 5G на развитие цифровых экосистем умных городов: наукометрический и патентный анализ // Распределенные компьютерные и телекоммуникационные сети: управление, вычисление, связь (DCCN-2020) : материалы XXIII Международной научной конференции, Москва, 14–18 сентября 2020 года – Москва: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. – 2020. – С. 685-695.
12. Yang C., Liang P., Fu L., Cui G., F. Huang F., Teng F., Bangash Y. A. Using 5G in smart cities: A systematic mapping study // Intelligent Systems with Applications. – 2022. – 14. – 200065.
13. Kumar R., Sinwar D., Singh V. QoS aware resource allocation for coexistence mechanisms between eMBB and URLLC: Issues, challenges, and future directions in 5G // Computer Communications. – 2024. – 213. – P. 208-235.
14. Kandoi A., Raftopoulou M., Litjens R. Assessment of 5G RAN Features for Integrated Services Provisioning in Smart Cities // 18th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob), Thessaloniki, Greece. – 2022. – P.81-87.
15. Тихвинский В.О., Терентьев С.В., Коваль В.А. Развитие сетей мобильной связи от 5G Advanced к 6G. Проекты, технологии, архитектура // Изд-во Техносфера. – 2023.
16. Пшеничников А. П. Даудов И. М. Концептуальные основы будущих сетей // REDS: Телекоммуникационные устройства и системы. – 2022. – 12(2). – С. 24-28.
17. Moltchanov D., Sopin E., Begishev V., Samuylov A., Koucheryavy Y., Samouylov K. A Tutorial on Mathematical Modeling of 5G/6G Millimeter Wave and Terahertz Cellular Systems // IEEE Communications Surveys and Tutorials. – 2022. – 24. – P.1072–1116.

18. Bolla R., Bruschi R., Lombardo C., Mohammadpour A., Trivisonno R., Poe W.Y. A 5G multi-gNodeB simulator for ultra-reliable 0.5–100 GHz communication in indoor Industry 4.0 environments // *Computer Networks*. – 2023. – 237. – № 110103.
19. ITU-R. Propagation Data and Prediction Methods Required for the Design of Terrestrial Line-of-Sight Systems. Recommendation. – 2015. – 12. – P. 530.
20. ITU-R. Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT2020,” ITU-R. Recommendation ITU-R M.2412, October 2017.
21. 3GPP TR 38.901. Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz, 2023. Release 17.1.0.
22. Наумов В.А., Самуйлов К.Е. О связи ресурсных систем массового обслуживания с сетями Эрланга // *Информатика и её применения*. – 2016. – 10(3). – С. 9–14.
23. Горбунова А.В., Наумов В.А., Гайдамака Ю.В., Самуйлов К.Е. Ресурсные системы массового обслуживания как модели беспроводных систем связи // *Информатика и её применения*. – 2018. – 12(3). – С. 48–55.
24. Naumov V., Samuilov K. Analysis of Networks of the Resource Queuing Systems // *Automation and Remote Control*. – 2018. – 79. – P.822–829.
25. Naumov V., Samouylov K. Resource System with Losses in a Random Environment // *Mathematics*. – 2021. – 9(21). – 2685.
26. Daraseliya A., Sopin E., Moltchanov D., Koucheryavy Y., Samouylov, K. Performance of Offloading Strategies in Collocated Deployments of Millimeter Wave NR-U Technology // *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. – 2023. – 72(2). – P.2535–2549.
27. Ageev K., Sopin E., Samouylov K. Resource Sharing Model with Minimum Allocation for the Performance Analysis of Network Slicing // *Communications in Computer and Information Science*. – 2021. – 1391. – P. 378-389.
28. Тихомиров И.А., Моисеева С.П. Ресурсные бесконечно линейные сети массового обслуживания с рекуррентным входящим потоком // *Информационные технологии и математическое моделирование (ИТММ-*

- 2023): Материалы XXII Международной конференции имени А.Ф. Терпугова, Томск, 04–09 декабря 2023 года. – Томск: Национальный исследовательский Томский государственный университет. – 2024. – С.45-50.
29. Тихоненко О. М. Обобщенная задача Эрланга для систем обслуживания с ограниченным суммарным объемом // Проблемы передачи информации. – 2005. – 41(3). – С. 64–75.
30. Наумов В.А., Самуйлов К.Е., Самуйлов А.К. О суммарном объеме ресурсов, занимаемых обслуживаемыми заявками // Автоматика и Телемеханика. – 2016. – 8. – С.125–135.
31. Kochetkova I., Makeeva E., Chursin A., Zeifman A., Satin Y., Kovalev I. Convergence bounds for limited processor sharing queue with impatience for analyzing non-stationary file transfer in wireless network // Mathematics. – 2022. – 10(1).
32. Ли Т.А., Левкович К.А., Михайлова В.И., Макеева Е. Д. О задаче идентификации объектов с использованием информации о состоянии канала и характеристик сигнала // Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем: Материалы Всероссийской конференции с международным участием, Москва, 18–22 апреля 2022 года. – Москва: Российский университет дружбы народов (РУДН). – 2022. – С.137-141.
33. Князьков Г.В., Макеева Е.Д К анализу простейшей модели системы обнаружения киберугроз в виде цепи Маркова // Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем: материалы Всероссийской конференции с международным участием, Москва, 17–21 апреля 2023 года. – Москва: Российский университет дружбы народов (РУДН). – 2023. – С.338-340.
34. Bairagi A.K., Munir M.S., Alsenwi M., Tran N.H., Alshamrani S.S., Masud M., Han Z., Hong C.S. Coexistence Mechanism between eMBB and URLLC in 5G

- Wireless Networks // IEEE Transactions on Communications. – 2021. – 69. – P.1736–1749.
35. Макеева, Е. Д., Гудкова И.А. К анализу модели совместного обслуживания трафика с малыми задержками URLLC и трафика ресурсоёмких приложений eMBB в сети пятого поколения // Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем: Материалы Всероссийской конференции с международным участием, Москва, 15–19 апреля 2019 года. – Москва: Российский университет дружбы народов (РУДН). – 2019. – С.156-159.
 36. Gerasin I., Krasilov A., Khorov E. Dynamic Multiplexing of URLLC Traffic and eMBB Traffic in an Uplink Using Nonorthogonal Multiple Access // Journal of Communications Technology and Electronics. – 2020. – 65. – P.750–755.
 37. Saggese F., Moretti M., Popovski, P. Power Minimization of Downlink Spectrum Slicing for eMBB and URLLC Users // IEEE Transactions on Wireless Communications. – 2022. – 21.
 38. Makeeva, E. Approaches to the joint scheduling of URLLC and EMBB traffic transmission in wireless 5G networks // Цифровое общество: образование, наука, карьера, Москва, 15 декабря 2021 года. – Москва: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Московский государственный университет пищевых производств". – 2021. – P. 410 - 420.
 39. Popovski P., Trillingsgaard K.F., Simeone O., Durisi G. 5G Wireless Network Slicing for eMBB, URLLC, and mMTC: A Communication-Theoretic View // IEEE Access. – 2018. – 6. – P.55765–55779.
 40. Shen X., Zeng Z., Liu X. RIS-Assisted Network Slicing Resource Optimization Algorithm for Coexistence of eMBB and URLLC // Electronics. – 2022. – 11.
 41. Filali A., Mlika Z., Cherkaoui S., Kobbane A. Dynamic SDN-Based Radio Access Network Slicing With Deep Reinforcement Learning for URLLC and eMBB Services // IEEE Transactions on Network Science and Engineering. – 2022. – 9. – P.2174–2187.

42. Chen G., Shao, R., Shen, F., Zeng Q. Slicing Resource Allocation Based on Dueling DQN for eMBB and URLLC Hybrid Services in Heterogeneous Integrated Networks // Sensors. – 2023. – 23.
43. Yun J., Goh Y., Yoo W., Chung J.M. 5G Multi-RAT URLLC and eMBB Dynamic Task Offloading With MEC Resource Allocation Using Distributed Deep Reinforcement Learning // IEEE Internet of Things Journal. – 2022. – 9. – P.20733–20749.
44. Li J., Zhang X. Deep Reinforcement Learning-Based Joint Scheduling of eMBB and URLLC in 5G Networks // IEEE Wireless Communications Letters. – 2020. – 9. – P.1543–154.
45. Alsenwi M., Tran N.H., Bennis M., Pandey S.R., Bairagi A.K., Hong, C.S. Intelligent Resource Slicing for eMBB and URLLC Coexistence in 5G and Beyond: A Deep Reinforcement Learning Based Approach // IEEE Transactions on Wireless Communications. – 2021. 20. – P.4585–4600.
46. Huang Y., Thomas Hou Y., Lou, W. DELUXE: A DL-Based Link Adaptation for URLLC/eMBB Multiplexing in 5G NR // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. – 2022. – 40. – P.143–162.
47. Ivanova D., Markova E., Moltchanov D., Pirmagomedov R., Koucheryavy Y., Samouylov K. Performance of Priority-Based Traffic Coexistence Strategies in 5G mmWave Industrial Deployments // IEEE Access. – 2022. – 10. P.9241–9256.
48. Ivanova D., Adou Y., Markova E., Gaidamaka Y., Samouylov K. Mathematical Framework for Mixed Reservation- and Priority-Based Traffic Coexistence in 5G NR Systems // Mathematics. – 2023. – 11.
49. Esmaeily A., Mendis H.V.K., Mahmoodi T., Kravetska K. Beyond 5G Resource Slicing with Mixed-Numerologies for Mission Critical URLLC and eMBB Coexistence // IEEE Open Journal of the Communications Society. – 2023. – 4. – P.727–747.
50. Almekhlafi M., Arfaoui M.A., Elhattab M., Assi, C., Ghayeb A. Joint Resource Allocation and Phase Shift Optimization for RIS-Aided eMBB/URLLC Traffic

- Multiplexing // IEEE Transactions on Communications. – 2022. – 70. – P.1304–1319.
51. Janković J., Ilić Šišul G. URLLC Shadowing Estimation in eMBB-URLLC Multiplexing for Geospatially Correlated PPP Channel // IEEE Wireless Communications Letters. – 2022. – 11. – P.2460–2464.
 52. Zhang J., Liu L., Ruan J., Li L., Wang K., Sun R. A Service-Aware Latency-Relaxed URLLC Multiplexing Strategy within eMBB Traffic for Hyperloop Communications // Wireless Communications and Mobile Computing. – 2022.
 53. Kesava G.S., Mehta N.B. Multi-Connectivity for URLLC and Coexistence With eMBB in Time-Varying and Frequency-Selective Fading Channels // IEEE Transactions on Wireless Communications. – 2023. – 22. – P.3599–3611.
 54. Chen N., Cheng Z., Zhao Y., Huang L., Du X., Guizani M. Joint Dynamic Spectrum Allocation for URLLC and eMBB in Networks // IEEE Transactions on Network Science and Engineering. – 2023. – P.1–14.
 55. Prathyusha Y., Sheu T.L. Coordinated Resource Allocations for eMBB and URLLC in 5G Communication Networks // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2022. – 71. – P.8717–8728.
 56. Liu B., Zhu P., Li J., Wang D., Wang Y. Energy-Efficient Optimization via Joint Power and Subcarrier Allocation for eMBB and URLLC Services // IEEE Wireless Communications Letters. – 2022. – 11. – P.2340–2344
 57. Shi B., Zheng F.C., She C., Luo J., Burr A.G. Risk-Resistant Resource Allocation for eMBB and URLLC Coexistence Under M/G/1 Queueing Model // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2022. – 71. – P.6279–6290.
 58. Darabi M., Jamali V., Lampe L., Schober R. Hybrid Puncturing and Superposition Scheme for Joint Scheduling of URLLC and eMBB Traffic // IEEE Communications Letters. – 2022. – 26. – P.1081–1085.
 59. Al-Ali M., Yaacoub E. Resource allocation scheme for eMBB and uRLLC coexistence in 6G networks // Wireless Networks. – 2023. – 29. – P.2519–2538.

60. Chen Q., Wu, J., Wang, J., Jiang, H. Coexistence of URLLC and eMBB Services in MIMO-NOMA Systems // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2023. – 72. – P.839–851.
61. Liu B., Zhu P., Li J., Wang D., You X. Energy-Efficient Optimization in Distributed Massive MIMO Systems for Slicing eMBB and URLLC Services // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2023. – P.1–15.
62. Setayesh M., Bahrami S., Wong V.W. Resource Slicing for eMBB and URLLC Services in Radio Access Network Using Hierarchical Deep Learning // IEEE Transactions on Wireless Communications. – 2022. – 21. – P.8950–8966.
63. Zhao Y., Chi X., Qian L., Zhu Y., Hou F. Resource Allocation and Slicing Puncture in Cellular Networks With eMBB and URLLC Terminals Coexistence // IEEE Internet of Things Journal. – 2022. – 9. – P.18431–18444.
64. Ranasohaib R.M.S., Onireti O., Sambo Y., Swash R., Ansari S., Imran M.A. Intelligent Resource Management for eMBB and URLLC in 5G and beyond Wireless Networks // IEEE Access. – 2023. – 11. P.65205–65221.
65. Jiang X., Liang K., Chu X., Li C., Karagiannidis G.K. Multiplexing eMBB and URLLC in Wireless Powered Communication Networks: A Deep Reinforcement Learning-based Approach // IEEE Wireless Communications Letters. – 2023.
66. Kassab O. Simeone, Popovski P. Coexistence of URLLC and eMBB services in the C-RAN uplink: an information-theoretic study // IEEE Global Communications Conference, GLOBECOM 2018 – Proceedings. – 2018. – P.1-6.
67. Сегайер А., Цитович И.И. Построение моделей мультисервисных сетей // Электросвязь. – 2009. – 9. – С. 54-57.
68. Назаров А. А., Моисеева С. П. Метод асимптотического анализа в теории массового обслуживания: монография //Томск: Изд-во Науч.-технической лит. – 2006. – ISBN 5-89503-299-0.
69. Naumov V., Samouylov K., Yarkina N., Sopin E., Andreev S., Samuylov A. LTE performance analysis using queuing systems with finite resources and random requirements // В сборнике: International Congress on Ultra-Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops. 7. Сер. "2015 7th

- International Congress on Ultra-Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops, ICUMT 2015". – 2016. – С. 100-103.
70. Dudin A.N., Klimenok V. I., Vishnevsky V. M. The theory of queuing systems with correlated flows // Cham: Springer International Publishing. – 2019. – P.410 – ISBN 978-3-030-32072-0.
71. Полин Е.П., Моисеева С.П., Моисеев А.Н. Применение отрицательного биномиального распределения для аппроксимации стационарного распределения числа заявок в СМО с входящим МАР-поток, интенсивность которого зависит от состояния системы // Управление большими системами: сборник трудов. – 2024. – 108. – С. 40-56.
72. Moiseev A., Shklennik M., Polin E. Infinite-server queueing tandem with Markovian arrival process and service depending on its state // Annals of Operations Research. – 2023. – 326(1). – P. 261-279.
73. Maslov A.A., Sebekin G.V., Stepanov S.N. Model of processes for joint maintenance of real-time multiservice traffic and elastic data traffic in a network of low-power mobile subscriber terminals based on high-throughput satellites // T-Comm. – 2024. – 18(3). – P. 41-49.
74. Koucheryavy Y., Lisovskaya E., Moltchanov D., Kovalchukov R., Samuylov, A. Quantifying the millimeter wave new radio base stations density for network slicing with prescribed SLAs // Computer Communications. – 2021. – 174. – P.13-27.
75. 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 (DCCN-2023). – 2023. – P.47-55.
76. Башарин Г.П. Лекции по математической теории телетрафика. – М.:РУДН, 2009. – С.342.
77. Basharin G.P., Gaidamaka Yu.V., Samouylov K.E. Mathematical theory of teletraffic and its application to the analysis of multiservice communication of

- next generation networks // Automatic Control and Computer Sciences. – 2013. – 47(2). – P.62-69.
78. Mahmood O.A., Khakimov A., Muthanna A., Paramonov A. Effect of Heterogeneous Traffic on Quality of Service in 5G Network // Lecture Notes in Computer Science. – 2019. – 11965 LNCS. – P.469-478.
79. Stepanova E.A., Bankov D.V., Khorov E.M., Lyakhov A.I. Influence of the Clock Drift on the Efficiency of the Power Save Mechanisms in Wi-Fi Networks // Journal of Communications Technology and Electronics. – 2022. – 67. – P.167-175.
80. Andrabi U.M., Stepanov S.N., Stepanov M.S., Kanishcheva M.G., Habinshuti F.X. The Model of Conjoint Servicing of Real Time and Elastic Traffic Streams Through Processor Sharing (PS) Discipline with Access Control // International Conference Engineering and Telecommunication. – 2021.
81. Вишневский В.М., Дудин А.Н., Клименок В.И. стохастические системы с коррелированными потоками. Теория и применение в телекоммуникационных сетях. – Москва. – 2018. – С.115.
82. Ageev K., Sopin E., Chursin A., Shorgin S. The probabilistic measures approximation of a resource queuing system with signals // Lecture Notes in Computer Science. – 2021. – 13144 LNCS. – P.80-91.
83. Sopin E., Ageev K., Samouylov K. Approximate analysis of the limited resources queuing system with signals // ECMS. – 2019. – 33(1). – P. 462-465.
84. Beschastnyi V., Ostrikova D., Moltchanov D., Gaidamaka Y., Koucheryavy Y., Samouylov K. Balancing Latency and Energy Efficiency in mmWave 5G NR Systems With Multiconnectivity // IEEE Communications Letters. – 2022. – 26(8). – P.1952-1956.
85. Sopin E., Begishev V. Samuyilov K. The Impact of Rate Adaptation on User Performance in 5G/6G mmWave/Sub-THz Systems // IEEE Communications Letters. – 2023. – 27(11). – P. 3137-3141.
86. Kochetkova I.A., Kushchazli A.I., Kharin P.A., Shorgin S.Y. Model for Analyzing Priority Admission Control of URLLC and eMBB Communications in

- 5G Networks as A Resource Queuing System // *Informatika i ee Primeneniya*. – 2021. – 15. – P.87–92.
87. Makeeva E., Polyakov N., Kharin P., Gudkova I. Probability Model for Performance Analysis of Joint URLLC and eMBB Transmission in 5G Networks // *Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems*, St. Petersburg, Russia, 26–28 августа 2019 года. – 2019. – 11660. – P.635-648.
88. Kushchazli A., Ageeva A., Kochetkova I., Kharin P., Chursin A., Shorgin S. Model of Radio Admission Control for URLLC and Adaptive Bit Rate eMBB in 5G Network // *CEUR Workshop Proceedings*. – 2021.
89. Avrachenkov K., Morozov E., Nekrasova R. Stability analysis of two-class retrial systems with constant retrial rates and general service times // *Performance Evaluation*. – 2023. – 159.
90. Nekrasova R., Morozov E., Efrosinin D., Stepanova N. Stability analysis of a two-class system with constant retrial rate and unreliable server // *Annals of Operations Research*. – 2023. – P.1-23.
91. Nekrasova R.S., Morozov E.V., Efrosinin D.V. Stability analysis of an unreliable two-class retrial system with constant retrial rates // *Distributed computer and communication networks: control, computation, communications (DCCN-2022): Материалы XXV Международной научной конференции, Москва, 26–30 сентября 2022 года – Москва: Российский университет дружбы народов (РУДН)*. – 2022. – P.194-199.
92. Макеева Е.Д. Сравнительный анализ моделей обслуживания широкополосного трафика при приоритетной передаче данных с малой задержкой в беспроводной сети // *Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем. Материалы Всероссийской конференции с международным участием*. – 2024. – С.138-141.
93. 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).
94. Макеева Е.Д., Савич В.Н., Харин П.А., Кочеткова И.А. Модель совместного обслуживания трафика с малыми задержками URLLC и широкополосного доступа eMBB в беспроводной сети в виде СМО с двумя орбитами // Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем : Материалы Всероссийской конференции с международным участием, Москва, 13–17 апреля 2020 года. – Москва: Российский университет дружбы народов (РУДН). – 2020. – С.101-106.
95. 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). – Р.17-24.
96. 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 (ИТММ-2023): Материалы XXII Международной конференции имени А.Ф. Терпугова, Томск, 04–09 декабря 2023 года. – Томск: Томский государственный университет, 2023. – С.173-177.
97. 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.
98. Макеева Е.Д., Аскеров А.Э., Кочеткова И.А. Анализ вероятностной модели затухания мощности сигнала в сценариях 3GPP TR 38.901 сети 5G // Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем. Материалы Всероссийской конференции с международным участием. – 2024. – С.142-146.

99. Макеева Е.Д., Поляков Н.А., Харин П.А., Гудкова И.А. Вероятностная модель для анализа характеристик совместной передачи трафика URLLC и eMBB в беспроводных сетях // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. – 2020. – 52. – Р.33-42.
100. 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. – Р.176-189.
101. 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 от 21.06.2023.
102. 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. – 33(4). – С.140-148.