

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Н. Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра системного анализа и автоматического управления

**МЕТОД ОПТИМИЗАЦИИ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕССОВ
ОБСЛУЖИВАНИЯ ВЫЗОВОВ В СЕТЯХ СОТОВОЙ СВЯЗИ**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

студентки 4 курса 421 группы
направления 09.03.01 Информатика и вычислительная техника
факультет компьютерных наук и информационных технологий
Кирдеевой Регины Амангельдыевны

Научный руководитель
доцент, к. ф.-м. н.

Е. П. Станкевич

Заведующий кафедрой
к. ф.-м. н., доцент

И. Е. Тананко

Саратов 2026

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Сотовые сети связи стали основой современного беспроводного общения, обеспечивая связь для миллионов пользователей по всему миру. В последние десятилетия наблюдается стремительный рост числа мобильных устройств, таких как смартфоны, планшеты, ноутбуки и IoT-устройства, что создает значительное увеличение трафика и разнообразия типов данных, передаваемых через сети. Этот рост требует от операторов сотовой связи постоянного анализа и оптимизации своих сетей, чтобы обеспечить пользователям высокое качество обслуживания (QoS). Приоритетное обслуживание хэндовер-вызовов является ключевой задачей, так как прерывание уже начавшегося разговора более нежелательно, чем блокировка нового вызова.

Цель бакалаврской работы — изучить методы оптимизации характеристик процессов обслуживания вызовов в беспроводных сотовых сетях связи.

Поставленная цель определила **следующие задачи**:

1. рассмотреть принципы функционирования сотовых сетей и особенности обслуживания разнотипных вызовов;
2. изучить основные математические модели и методы, применяемые для анализа и оптимизации характеристик обслуживания вызовов, разработать алгоритм и программу для оптимизации характеристик процессов обслуживания вызовов в беспроводных сотовых сетях;
3. проанализировать влияние ключевых параметров сети (таких как количество каналов, интенсивности потоков вызовов, дисциплины обслуживания) на её производительность.

Методологической основой работы послужили труды отечественных и зарубежных учёных в области теории телетрафика и сотовых сетей связи, таких как А. З. Меликов [1], М. Пагано [2], В. В. Крылов [3], А. Н. Берлин [4] и др.

Практическая значимость бакалаврской работы. В ходе выполнения выпускной квалификационной работы были разработаны три программы, реализующие оптимизацию числа резервных каналов в модели изолированной соты с резервированием каналов: программа минимизации вероятности блокировки новых вызовов при ограничении на потерю хэндовер-вызовов,

программа нахождения интервала допустимых значений резервных каналов с двусторонними ограничениями, а также программа максимизации числа резервных каналов с дополнительным ограничением на среднее число занятых каналов. Разработанные программы могут применяться операторами сотовой связи для балансировки качества обслуживания разнотипных вызовов и эффективного использования ресурсов сети.

Структура и объем работы. Бакалаврская работа состоит из введения, 5 разделов, заключения, списка использованных источников и приложения. Общий объем работы — 59 страниц, из них 47 страницы — основное содержание, включая 28 рисунков и 6 таблиц, список использованных источников информации — 20 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первый раздел «Архитектура сотовой сети и возникновение задачи оптимизации обслуживания вызовов» посвящён описанию принципов работы, эволюции сотовых сетей и архитектуры сети.

В подразделе 1.1 рассмотрены принципы работы и эволюция сотовых сетей от поколения 1G до 5G. Описана концепция сотовой связи, основанная на делении зоны покрытия на ячейки (соты), что позволяет эффективно использовать радиочастотный спектр за счёт его повторного использования. Кратко охарактеризованы основные поколения сотовых сетей, их ключевые технологии и возможности [5].

В подразделе 1.2 детально рассмотрена архитектура сотовой сети как пример реализации ресурсной модели. Описаны три основные подсистемы: подсистема базовых станций (BSS), подсистема коммутации (NSS) и подсистема эксплуатации и поддержки (OSS).

В подразделе 1.3 рассмотрен процесс хэндовера (передачи обслуживания). Описан «жёсткий» хэндовер, при котором мобильная станция разрывает соединение со старой базовой станцией и устанавливает его с новой. Показано, что хэндовер-вызовы имеют более высокий приоритет по сравнению с новыми вызовами, так как их прерывание более нежелательно для абонента. Это создаёт задачу оптимизации распределения каналов между двумя типами вызовов.

Второй раздел «Методы анализа и оптимизации процессов обслуживания вызовов» посвящён классификации стратегий доступа, опи-

санию математической модели изолированной соты с резервированием каналов и постановке оптимизационных задач.

В подразделе 2.1 приведена классификация стратегий доступа и дисциплин обслуживания. Рассмотрены стратегии без очередей (схема резервных каналов, Guard Channel Scheme) и стратегии с очередями (для хэндовер-вызовов и для новых вызовов), а также гибридные стратегии. Показано, что параметр g (число резервных каналов) является главным инструментом оптимизации: увеличение g снижает вероятность прерывания хэндовера P_h , но одновременно повышает вероятность блокировки нового вызова P_o [6].

В подразделе 2.2 описана математическая модель изолированной соты с резервированием каналов для предоставления приоритета хэндовер-вызовам [7, 8]. Рассматривается базовая модель работы изолированной соты беспроводной сети, реализующая стратегию резервирования каналов.

Сота содержит N однотипных радиочастотных каналов ($1 < N < \infty$). На эти каналы поступают два независимых пуассоновских потока вызовов: поток новых вызовов (o -вызовов) с интенсивностью λ_o и поток хэндовер-вызовов (h -вызовов) с интенсивностью λ_h .

Правила доступа в сети следующие. Поступивший h -вызов принимается на обслуживание, если в момент его поступления в системе имеется хотя бы один свободный канал. В противном случае h -вызов теряется. Поступивший o -вызов принимается только в том случае, если количество свободных каналов больше заданного параметра g , где $0 \leq g < N$. Иными словами, для приёма нового вызова необходимо наличие не менее $g + 1$ свободных каналов. Приоритетное обслуживание h -вызовов перед o -вызовами объясняется тем, что прерывание уже начавшегося разговора является более нежелательным, нежели блокировка нового вызова.

Предполагается, что время обслуживания o -вызовов имеет одинаковое показательное распределение со средним μ^{-1} . Поскольку показательное распределение не имеет памяти, времена обслуживания h -вызовов также имеют одинаковое показательное распределение с тем же средним μ^{-1} .

Пусть p_j обозначает стационарную вероятность состояния j , где $j = 0, \dots, N$ — число занятых каналов. С использованием стандартных формул для процесса рождения и гибели (BDP) имеем:

$$p_j = \begin{cases} \frac{\lambda_o + \lambda_h}{\mu} p_{j-1}, & j = \overline{1, N-g}, \\ \frac{\lambda_h}{\mu} p_{j-1}, & j = \overline{N-g+1, N}. \end{cases}$$

Нормирующее условие имеет вид:

$$\sum_{j=0}^N p_j = 1.$$

Тогда с учётом этих соотношений стационарное распределение вероятностей состояний системы находится следующим образом:

$$p_j = \begin{cases} \frac{(\lambda_o + \lambda_h)^j}{j! \mu^j} p_0, & 0 \leq j \leq N-g, \\ \frac{(\lambda_o + \lambda_h)^{N-g} \lambda_h^{j-(N-g)}}{j! \mu^j} p_0, & N-g < j \leq N, \end{cases}$$

где нормировочный множитель p_0 определяется из условия $\sum_{j=0}^N p_j = 1$:

$$p_0 = \left(\sum_{k=0}^{N-g} \frac{(\lambda_o + \lambda_h)^k}{k! \mu^k} + \sum_{k=N-g+1}^N \frac{(\lambda_o + \lambda_h)^{N-g} \lambda_h^{k-(N-g)}}{k! \mu^k} \right)^{-1}.$$

После нахождения стационарного распределения с использованием известной теоремы PASTA (Poisson Arrivals See Time Averages) находятся характеристики соты. Основными характеристиками в данной работе являются вероятность блокировки o -вызовов (P_o) и вероятность потери h -вызовов (P_h). Эти характеристики вычисляются следующим образом:

$$P_o(N, g) = \sum_{j=N-g}^N p_j, \quad P_h(N, g) = p_N.$$

Параметр g называется числом резервных (сторожевых) каналов. При $g = 0$ стратегия вырождается в полнодоступную схему без приоритетов. При $g = N - 1$ новые вызовы практически не принимаются.

С использованием этих формул сформулированы три оптимизационные задачи.

Первая задача (минимизация блокировки новых вызовов). При заданных N , λ_o , λ_h , μ и допустимой вероятности потери хэндовер-вызовов P_{h_0} требуется найти такое оптимальное значение g , чтобы минимизировать $P_o(N, g)$ при ограничении на $P_h(N, g)$:

$$P_o(N, g) \longrightarrow_g \min,$$

$$P_h(N, g) \leq P_{h_0}.$$

Задача легко решается с учётом свойства монотонности функций $P_o(N, g)$ и $P_h(N, g)$ относительно аргумента g при фиксированном N : $P_o(N, g)$ монотонно возрастает, а $P_h(N, g)$ монотонно убывает с ростом g . С учётом этого свойства одним из известных методов одномерного поиска (в частности, методом деления пополам) находится такое минимальное значение $g^* \in [0, N - 1]$, которое удовлетворяет ограничению $P_h(N, g^*) \leq P_{h_0}$. Именно это значение g^* и является решением задачи. При этом если $P_{h_0} < P_h(N, N - 1)$, то задача не имеет решения.

Вторая задача (нахождение интервала допустимых значений). При фиксированных N , λ_o , λ_h , μ и заданных ограничениях на величины $P_h(N, g)$ и $P_o(N, g)$ требуется найти такой промежуток изменения параметра g , внутри которого удовлетворяются оба ограничения. Формально требуется найти такие $\underline{g}, \bar{g} \in [0, N - 1]$, $\underline{g} \leq \bar{g}$, чтобы:

$$\bar{g} - \underline{g} \rightarrow \max,$$

$$P_o(N, g) \leq P_{o_0},$$

$$P_h(N, g) \leq P_{h_0} \quad \forall g \in [\underline{g}, \bar{g}],$$

где P_{o_0} и P_{h_0} — заданные числа.

Для решения этой задачи с учётом монотонности функций P_o и P_h предлагается следующий алгоритм.

Шаг 1. Если $P_{h_0} \leq P_h(N, N - 1)$ и/или $P_{o_0} < P_o(N, 0)$, то задача не имеет решения.

Шаг 2. Параллельно решаются следующие одномерные задачи:

$$g_o^* := \max\{g \mid P_o(N, g) \leq P_{o_0}\}, \quad g_h^* := \min\{g \mid P_h(N, g) \leq P_{h_0}\}.$$

Шаг 3. Если $g_o^* \leq g_h^*$, то задача не имеет решения; в противном случае решением задачи являются $\underline{g} := g_h^*$, $\bar{g} := g_o^*$.

Третья задача (максимизация резервных каналов с дополнительным ограничением). Необходимо найти такое максимальное значение g , чтобы удовлетворялись ограничения на $P_o(N, g)$, $P_h(N, g)$ и, вдобавок, на среднее число занятых каналов $N_{av}(N, g)$. Формально эта задача может быть описана так:

$$g \rightarrow \max,$$

при ограничениях:

$$P_o(N, g) \leq \varepsilon_o, \quad P_h(N, g) \leq \varepsilon_h, \quad N_{av}(N, g) \geq \tilde{N}_{av},$$

где ε_o , ε_h и \tilde{N}_{av} — заданные значения, а среднее число занятых каналов вычисляется как $N_{av}(N, g) = \sum_{j=0}^N j \cdot p_j$.

Для решения этой проблемы используется следующий алгоритм.

Шаг 1. Найти такое максимальное значение $g_0 \in [0, N - 1]$, чтобы удовлетворялось ограничение $N_{av}(N, g_0) \geq \tilde{N}_{av}$.

Шаг 2. Если $P_h(N, g_0) > \varepsilon_h$, задача не имеет решения.

Шаг 3. Если $P_o(N, g_0) \leq \varepsilon_o$, то $g^* := g_0$.

Шаг 4. В интервале $[0, g_0]$ найти такое максимальное значение \tilde{g} , чтобы условие $P_o(N, \tilde{g}) \leq \varepsilon_o$ было верным. Если $P_h(N, \tilde{g}) \leq \varepsilon_h$, то $g^* := \tilde{g}$; иначе задача не имеет решения.

Сложность предложенного алгоритма для решения оптимизационных задач (без учёта сложности вычисления $P_h(N, g)$, $P_o(N, g)$ и $N_{av}(N, g)$) достаточно невысока, так как эти алгоритмы требуют вычисления значений указанных выше функций максимум в $[\log_2 N]$ точках, где $[x]$ — целая часть x , а также проведения сравнения со значениями ε_o , ε_h и \tilde{N}_{av} .

Третий раздел «Программная реализация оптимизации числа резервных каналов» посвящён разработке программы для нахождения оптимального числа резервных каналов g^* , минимизирующего вероятность блокировки новых вызовов при ограничении на вероятность потери хэндовер-вызовов.

В подразделе 3.1 описан алгоритм расчёта, включающий 5 блоков: ввод параметров $(N, \lambda_o, \lambda_h, \mu, P_{h_0})$, проверка корректности данных, проверка суще-

ствования решения, поиск оптимального g методом деления пополам, вывод результатов.

В подразделе 3.2 приведено описание программы на языке Python. Перечислены используемые библиотеки (`math`), описаны функции $P_h(N, g, \lambda_o, \lambda_h, \mu)$ и `solve_optimal_g`. Приведён список основных идентификаторов в виде таблицы.

В подразделе 3.3 описан пример использования программы с оконным интерфейсом. Представлены результаты численных экспериментов в виде таблицы и графиков зависимости оптимального числа резервных каналов g^* от параметров системы $(N, \lambda_o, \lambda_h, \mu, P_{h_0})$. При фиксированных $\lambda_o = 2.0$, $\lambda_h = 1.0$, $\mu = 1.0$ и $P_{h_0} = 0.01$ установлено, что с ростом N оптимальное g^* убывает, так как увеличение общего числа каналов повышает пропускную способность системы, снижая потребность в резервировании. При фиксированных $N = 10$, $\lambda_h = 1.0$, $\mu = 1.0$ и $P_{h_0} = 0.01$ установлено, что с ростом λ_o оптимальное g^* возрастает, поскольку увеличение нагрузки от новых вызовов требует большего резервирования для защиты хэндовер-вызовов.

Четвертый раздел «Программная реализация оптимизации интервала значений резервных каналов» посвящён разработке программы для нахождения интервала значений g , удовлетворяющего заданным ограничениям на вероятности блокировки новых вызовов и потери хэндовер-вызовов.

В подразделе 4.1 описан алгоритм расчёта, включающий 5 блоков: ввод параметров $(N, \lambda_o, \lambda_h, \mu, P_{o_0}, P_{h_0})$, проверка корректности данных, проверка существования решения, нахождение границ g_h^* и g_o^* линейным перебором, проверка существования интервала и вывод результатов.

В подразделе 4.2 приведено описание программы на языке Python. Описаны функции $P_o(N, g, \lambda_o, \lambda_h, \mu)$ и `solve_interval`. Приведён список основных идентификаторов в виде таблицы.

В подразделе 4.3 описан пример использования программы с оконным интерфейсом. Представлены результаты численных экспериментов в виде таблицы и графиков зависимости границ интервала $[g, \bar{g}]$ от параметров системы $(N, \lambda_o, \lambda_h, \mu, P_{o_0}, P_{h_0})$. При фиксированных $\lambda_o = 2.0$, $\lambda_h = 1.0$, $\mu = 1.0$, $P_{o_0} = 0.05$ и $P_{h_0} = 0.01$ установлено, что с ростом N ширина интервала $\bar{g} - g$ увеличивается, так как увеличение общего числа каналов расширяет про-

странство допустимых решений, позволяя использовать большее число резервных каналов без нарушения ограничения на блокировку новых вызовов. При фиксированных $N = 10$, $\lambda_o = 2.0$, $\mu = 1.0$, $P_{o_0} = 0.05$ и $P_{h_0} = 0.01$ установлено, что с ростом λ_h ширина интервала уменьшается, так как увеличение потока хэндовер-вызовов повышает загрузку системы, снижая максимально допустимое число резервных каналов.

Пятый раздел «Программная реализация максимизации числа резервных каналов с дополнительными ограничениями» посвящён разработке программы для нахождения максимального значения g , удовлетворяющего трём ограничениям: на вероятность блокировки новых вызовов, вероятность потери хэндовер-вызовов и среднее число занятых каналов.

В подразделе 5.1 описан алгоритм расчёта, включающий 7 блоков: ввод параметров $(N, \lambda_o, \lambda_h, \mu, \varepsilon_o, \varepsilon_h, \tilde{N}_{av})$, проверка корректности данных, нахождение g_0 по ограничению на N_{av} , проверка ограничений на P_h и P_o при $g = g_0$, поиск максимального \tilde{g} в интервале $[0, g_0]$ с проверкой обоих ограничений, вывод результатов.

В подразделе 5.2 приведено описание программы на языке Python. Описаны функции $N_{av}(N, g, \lambda_o, \lambda_h, \mu)$ и `solve_max_g`. Приведён список основных идентификаторов в виде таблицы.

В подразделе 5.3 описан пример использования программы с оконным интерфейсом. Представлены результаты численных экспериментов в виде таблицы и графиков зависимости оптимального числа резервных каналов g^* от параметров системы $(N, \lambda_o, \lambda_h, \mu, \varepsilon_o, \varepsilon_h, \tilde{N}_{av})$. При фиксированных $\lambda_o = 2.0$, $\lambda_h = 1.0$, $\mu = 1.0$, $\varepsilon_o = 0.05$, $\varepsilon_h = 0.01$ и $\tilde{N}_{av} = 2.0$ установлено, что с ростом N оптимальное g^* возрастает, так как увеличение общего числа каналов позволяет выделять больше резервных каналов для защиты хэндовер-вызовов без нарушения ограничений на блокировку новых вызовов и среднее число занятых каналов. При фиксированных $N = 10$, $\lambda_h = 1.0$, $\mu = 1.0$, $\varepsilon_o = 0.05$, $\varepsilon_h = 0.01$ и $\tilde{N}_{av} = 2.0$ установлено, что с ростом λ_o оптимальное g^* убывает, поскольку увеличение нагрузки от новых вызовов приводит к росту вероятности блокировки, что вынуждает уменьшать число резервных каналов для соблюдения ограничения ε_o .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе была исследована математическая модель изолирован-

ной соты с резервированием каналов для обслуживания разнотипных вызовов в сотовых сетях связи. Проведён анализ влияния числа резервных каналов на ключевые характеристики качества обслуживания: вероятность блокировки новых вызовов и вероятность потери хэндовер-вызовов. Рассмотрены три оптимизационные задачи: минимизация вероятности блокировки новых вызовов при ограничении на вероятность потери хэндовер-вызовов, нахождение интервала допустимых значений числа резервных каналов с двусторонними ограничениями, а также максимизация числа резервных каналов с дополнительным ограничением на среднее число занятых каналов. Это позволило выявить основные закономерности и компромиссы, возникающие при управлении ресурсами в соте. Разработаны три программы на языке Python с графическим интерфейсом, реализующие данные задачи.

Основные источники информации:

1. Меликов, А.З. Телетрафик: Модели, методы, оптимизация / А.З. Меликов Л.А. Пономаренко В.В. Паладюк // Телетрафик: Модели, методы, оптимизация — К.: ИПК "Политехника 2007. — 256 с.
2. Пагано М. Модели телетрафика : учебное пособие / М. Пагано, В. В. Рыков, Ю. С. Хохлов. – М.: ИНФРА-М, 2024. — 178 с.
3. Крылов, В.В. Теория телетрафика и её приложение / В.В. Крылов С.С. Самохвалова // Теория телетрафика и её приложение. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. — 288 с.
4. Берлин, А.Н. Цифровые сотовые системы связи / А.Н. Берлин // Цифровые сотовые системы связи – М.: Эко-Трендз, 2007. — 296 с.
5. Романенко, Т. С. Основы беспроводной связи / Т. С. Романенко // Основы беспроводной связи.- М.: Издательство "Наука". - 2020. - 216 с.
6. Кожанов, Ю. Ф. Теория телетрафика: учебное пособие / Ю. Ф. Кожанов - Санкт-Петербург: СПбГУТ им. М.А. Бонч-Бруевича, 2020. - 203 с.
7. Иверсен, В. Б. Разработка телетрафика и планирование сетей : учебное пособие / В. Б. Иверсен - М.: ИНТУИТ, Ай Пи Ар Медиа, 2024. - 616 с.
8. Пономарев, Д. Ю. Введение в теорию телетрафика : учебное пособие / Д. Ю. Пономарев, К. Э. Гаипов — Красноярск : СибГУ им. М.Ф. Решетнева, 2021. - 110 с.