

УДК 33

Экономические аспекты моделирования сети беспроводного доступа

Мулекаев Тимур Ринатович

Магистр
Российский государственный университет
нефти и газа им. И.М. Губкина,
119991, Российская Федерация, Москва, Ленинский пр., 65;
e-mail: mulekaev2311@gmail.com

Колосов Виктор Антонович

Магистр
Российский государственный геологоразведочный университет
им. Серго Орджоникидзе,
117485, Российская Федерация, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 23;
e-mail: kolosov@mgi.ru

Аннотация

В данной статье представлена математическая модель сети беспроводного доступа, которая позволяет оптимизировать пропускную способность и энергоэффективность системы связи. Предложенный подход базируется на использовании стохастических методов теории массового обслуживания и теории игр для моделирования взаимодействия между пользователями и базовыми станциями в условиях динамически меняющейся сетевой инфраструктуры. В качестве ключевых параметров модели рассматриваются интенсивность потока заявок, время обслуживания, вероятность блокировки, а также показатели качества сервиса (QoS) и качества восприятия (QoE). Для оценки производительности сети применяются методы имитационного моделирования с использованием специализированного программного обеспечения, такого как MATLAB и NS-3. Результаты численных экспериментов демонстрируют, что разработанная модель позволяет повысить эффективность функционирования беспроводной сети на 15-20% по сравнению с существующими решениями за счет динамической адаптации параметров передачи данных к изменяющимся условиям радиоканала и трафика. Практическая значимость полученных результатов заключается в возможности их применения при проектировании и оптимизации сетей 5G и последующих поколений мобильной связи.

Для цитирования в научных исследованиях

Мулекаев Т.Р., Колосов В.А. Экономические аспекты моделирования сети беспроводного доступа // Экономика: вчера, сегодня, завтра. 2024. Том 14. № 5А. С. 184-195.

Ключевые слова

Беспроводные сети, математическое моделирование, теория массового обслуживания, теория игр, имитационное моделирование, пропускная способность, энергоэффективность, качество сервиса, качество восприятия.

Введение

Стремительное развитие беспроводных технологий и экспоненциальный рост объемов мобильного трафика привели к необходимости разработки новых подходов к моделированию и оптимизации сетей радиодоступа. Согласно отчету Cisco Visual Networking Index, к 2023 году глобальный мобильный трафик данных вырастет в 7 раз по сравнению с 2017 годом и достигнет 77 эксабайт в месяц [Agiwal, Roy, Saxena, 2016]. В этих условиях традиционные методы проектирования беспроводных сетей, основанные на детерминированных моделях и статической конфигурации параметров, становятся малоэффективными. Для обеспечения высокой производительности и качества обслуживания в современных сетях 5G и последующих поколений необходимо использовать динамические и адаптивные механизмы управления радиоресурсами, учитывающие стохастический характер трафика и изменчивость параметров радиоканала.

Существующие подходы к моделированию беспроводных сетей можно условно разделить на две группы: аналитические и имитационные. Аналитические модели, как правило, основаны на использовании методов теории массового обслуживания и позволяют получить точные выражения для основных показателей производительности системы, таких как вероятность блокировки, среднее время пребывания заявки в системе и среднее число заявок в очереди [Baï, Heath, 2015]. Однако применимость аналитических моделей ограничена рядом допущений, связанных с пуассоновским характером входящего потока заявок, экспоненциальным распределением времени обслуживания и бесконечностью размера буфера. Имитационные модели, напротив, позволяют учесть более широкий спектр факторов, влияющих на работу сети, включая мобильность пользователей, интерференцию, многолучевое распространение сигнала и т.д. [Bogale, Le, 2016]. Недостатком имитационного моделирования является высокая вычислительная сложность и потребность в значительных объемах исходных данных для обеспечения адекватности результатов.

В данной статье предлагается комбинированный подход к моделированию сети беспроводного доступа, сочетающий в себе элементы аналитического и имитационного моделирования. Ключевой особенностью разработанной модели является использование стохастических методов теории игр для описания взаимодействия между пользователями и базовыми станциями в условиях неполноты информации и конфликта интересов [Buzzi, D'Andrea, 2015]. В отличие от классических моделей теории массового обслуживания, учитывающих лишь интенсивность потока заявок и время обслуживания, предложенный подход позволяет принимать во внимание такие факторы, как качество сервиса, качество восприятия, энергопотребление и ценовые предпочтения абонентов. Для оценки производительности сети и верификации разработанных алгоритмов применяются методы имитационного моделирования с использованием программных средств MATLAB и NS-3.

Дальнейшее изложение материала организовано следующим образом. В разделе II приводится формальное описание математической модели сети беспроводного доступа,

включая используемые обозначения, допущения и основные расчетные соотношения. Раздел III посвящен вопросам практической реализации предложенных алгоритмов и методике проведения имитационных экспериментов. Обсуждение полученных результатов и их сравнение с существующими решениями приводится в разделе IV. В заключительном разделе V подводятся итоги проведенного исследования и намечаются направления дальнейшей работы.

Материалы и методы

Рассмотрим модель сети беспроводного доступа, состоящую из N базовых станций (БС) и K мобильных пользователей (МП). Каждая БС имеет M каналов для обслуживания МП, причем каналы могут динамически перераспределяться между соседними БС в зависимости от загрузки сети и требований к качеству сервиса. МП генерируют потоки заявок на передачу данных в соответствии с пуассоновским распределением с интенсивностью λ_k ($k = 1, 2, \dots, K$). Время обслуживания заявок имеет экспоненциальное распределение со средним значением $\frac{1}{\mu_k}$.

Для описания взаимодействия между БС и МП используется модель некооперативной игры в нормальной форме [Buzzi, Divsalar, 2016]. Множество игроков включает в себя все БС и МП, участвующие в процессе передачи данных. Стратегией i -й БС ($i=1, 2, \dots, N$) является вектор $s_i = (s_{i1}, s_{i2}, \dots, s_{iM})$, где $s_{im} \in \{0, 1\}$ - индикатор использования m -го канала для обслуживания МП. Стратегией k -го МП является вектор $u_k = (u_{k1}, u_{k2}, \dots, u_{kN})$, где $u_{kn} \in \{0, 1\}$ - индикатор подключения к n -й БС. Выигрыш i -й БС определяется следующим образом:

$$H_{i(s_i, u)} = \sum_k k = 1^K r_{ik(s_i, u_k)} - C_{i(s_i)}$$

где $r_{ik(s_i, u_k)}$ - доход, получаемый i -й БС от обслуживания k -го МП при заданных стратегиях s_i и u_k ; $C_{i(s_i)}$ - затраты на эксплуатацию каналов связи, зависящие от выбранной стратегии s_i .

Доход $r_{ik(s_i, u_k)}$ складывается из двух компонент: платы за подключение p_{ik} и платы за объем переданных данных d_{ik} :

$$r_{ik(s_i, u_k)} = p_{ik} \cdot u_{ki} + d_{ik} \cdot v_{ik(s_i, u_k)}$$

где $v_{ik(s_i, u_k)}$ - объем данных, переданный между i -й БС и k -м МП при заданных стратегиях s_i и u_k .

Затраты $C_{i(s_i)}$ включают в себя стоимость аренды частотного ресурса f_i , энергопотребление базовых станций e_i и затраты на эксплуатацию каналов связи b_i :

$$C_{i(s_i)} = f_i + e_i \cdot \sum_m m = 1^M s_{im} + b_i \cdot \sum_k k = 1^K \Sigma_m = 1^M s_{im} \cdot u_{ki}$$

Выигрыш k -го МП определяется исходя из качества сервиса $Q_{k(u_k, s)}$ и суммарных затрат на связь $C_{k(u_k)}$:

$$G_{k(u_k, s)} = Q_{k(u_k, s)} - C_{k(u_k)}$$

Качество сервиса $Q_{k(u_k, s)}$ зависит от скорости передачи данных $R_k(u_k, s)$ и вероятности блокировки $B_k(u_k, s)$:

$$Q_{k(u_k, s)} = \alpha_k \cdot \ln(1 + R_k(u_k, s)) - \beta_k \cdot B_k(u_k, s)$$

где α_k и β_k - весовые коэффициенты, отражающие предпочтения k -го МП относительно скорости передачи данных и вероятности блокировки соответственно.

Скорость передачи данных $R_k(u_k, s)$ вычисляется на основе пропускной способности радиоканала $C_k(u_k, s)$ и загрузки сети $\rho_{k(u_k, s)}$:

$$R_k(u_k, s) = C_k(u_k, s) \cdot (1 - \rho_{k(u_k, s)})$$

Пропускная способность радиоканала $C_k(u_k, s)$ определяется по формуле Шеннона:

$$C_k(u_k, s) = W_k \cdot \log_2 \left(1 + P_k \cdot \frac{g_k(u_k, s)}{N_0 \cdot W_k} \right)$$

где W_k - ширина полосы частот, выделенная k -му МП; P_k - мощность передатчика БС; $g_k(u_k, s)$ - коэффициент усиления радиоканала между k -м МП и обслуживающей его БС; N_0 - спектральная плотность мощности шума.

Загрузка сети $\rho_{k(u_k, s)}$ вычисляется как отношение интенсивности поступления заявок λ_k к интенсивности их обслуживания $\mu_{k(u_k, s)}$:

$$\rho_{k(u_k, s)} = \frac{\lambda_k}{\mu_{k(u_k, s)}}$$

Интенсивность обслуживания $\mu_{k(u_k, s)}$ зависит от числа каналов $M_{k(u_k, s)}$, выделенных k -му МП:

$$\mu_{k(u_k, s)} = M_{k(u_k, s)} \cdot \mu_k$$

Число каналов $M_{k(u_k, s)}$ определяется исходя из стратегий БС и МП:

$$M_{k(u_k, s)} = \sum_i i = 1^{N \Sigma m} = 1^M s_{im} \cdot u_{ki}$$

Вероятность блокировки $B_k(u_k, s)$ находится по формуле Эрланга:

$$B_{k(u_k, s)} = \frac{(\rho_{k(u_k, s)})_{k(u_k, s)}^M}{M_{k(u_k, s)}! \cdot \sum_j j = \frac{0^{M^j}_{k(u_k, s)}(\rho_{k(u_k, s)})}{j!}}$$

Затраты k -го МП на связь $C_k(u_k)$ включают в себя плату за подключение и плату за объем переданных данных:

$$C_{k(u_k)} = \sum_i i = 1^N (p_{ik} \cdot u_{ki} + d_{ik} \cdot v_{ik(u_k, s_i)})$$

Поиск равновесных стратегий БС и МП осуществляется с помощью итеративного алгоритма на основе метода наилучших ответов [8]. На каждой итерации алгоритма БС и МП независимо выбирают стратегии, максимизирующие их индивидуальные выигрыши при фиксированных стратегиях остальных игроков. Процесс продолжается до тех пор, пока не будет достигнута ситуация равновесия Нэша, в которой ни одному из игроков невыгодно отклоняться от выбранной стратегии в одностороннем порядке.

Для оценки производительности сети и верификации разработанных алгоритмов используются методы имитационного моделирования. Моделирование выполняется в программной среде MATLAB с применением инструментария LTE Toolbox и Simulink. Параметры модели, такие как количество БС и МП, интенсивность потоков заявок, распределение времени обслуживания и т.д., задаются на основе статистических данных, полученных из реальных сетей LTE. Результаты моделирования включают в себя оценки пропускной способности, вероятности блокировки, времени задержки пакетов и других показателей качества сервиса.

Сравнение разработанной модели с существующими решениями проводится путем серии вычислительных экспериментов на тестовых сценариях различной сложности. В качестве базовых вариантов рассматриваются модели на основе теории массового обслуживания (например, М/М/м/К) и модели равномерного распределения радиоресурсов между МП (Round Robin). Критериями сравнения служат интегральные показатели производительности сети, такие как средняя пропускная способность, вероятность блокировки и степень удовлетворенности пользователей качеством сервиса.

Результаты исследования

Проведенные численные эксперименты демонстрируют высокую эффективность разработанной математической модели сети беспроводного доступа в сравнении с традиционными подходами. Применение методов теории игр и стохастической оптимизации позволило повысить среднюю пропускную способность системы на 17,6% при одновременном снижении вероятности блокировки на 23,2% в сценарии с 50 МП и 10 БС. Анализ зависимости показателей производительности от интенсивности потока заявок показал, что предложенный алгоритм динамического распределения радиоресурсов обеспечивает стабильное качество сервиса даже при высокой загрузке сети, в то время как метод Round Robin демонстрирует резкое ухудшение характеристик при $\lambda > 0,8$ Эрл. Среднее время задержки пакетов в разработанной модели составило 12,4 мс против 19,7 мс в модели М/М/м/К, что свидетельствует о более эффективном использовании доступной полосы пропускания за счет учета приоритетов трафика и адаптивного управления очередями.

Ключевым преимуществом предложенного подхода является возможность гибкой настройки параметров модели в соответствии с требованиями конкретного сценария развертывания сети. Варьирование весовых коэффициентов α_k и β_k в функции полезности МП позволяет достичь оптимального баланса между скоростью передачи данных и вероятностью блокировки в зависимости от типа предоставляемых услуг (голосовая связь,

потокое видео, веб-серфинг и т.д.). Результаты моделирования показывают, что увеличение значения α_k на 0,1 приводит к росту средней пропускной способности на 5,3% при фиксированном значении $\beta_k=0,5$. В то же время, повышение β_k на ту же величину снижает вероятность блокировки на 7,8% ценой некоторого уменьшения скорости передачи данных.

Другим важным результатом является демонстрация эффективности динамических механизмов ценообразования, используемых в модели для балансировки нагрузки между БС и предотвращения перегрузки отдельных сегментов сети. Адаптивное изменение тарифов на подключение p_{ik} и передачу данных d_{ik} позволяет перенаправлять потоки МП к менее загруженным БС, тем самым повышая общую производительность системы. Численные эксперименты показали, что введение динамических цен приводит к снижению среднеквадратического отклонения загрузки БС на 31,5% по сравнению со статическим ценообразованием при сохранении приемлемого уровня доходов оператора связи.

Анализ зависимости энергетической эффективности сети от используемых стратегий управления радиоресурсами выявил значительный потенциал энергосбережения, достигаемый за счет гибкого отключения неиспользуемых каналов связи и динамической регулировки мощности передатчиков БС. Результаты моделирования демонстрируют сокращение среднего энергопотребления на 19,4% при использовании разработанного алгоритма в сравнении с фиксированной конфигурацией сети. Дополнительное уменьшение затрат энергии может быть достигнуто путем кооперативного взаимодействия между БС, например, за счет динамического переключения отдельных сот в "спящий" режим при низкой интенсивности трафика.

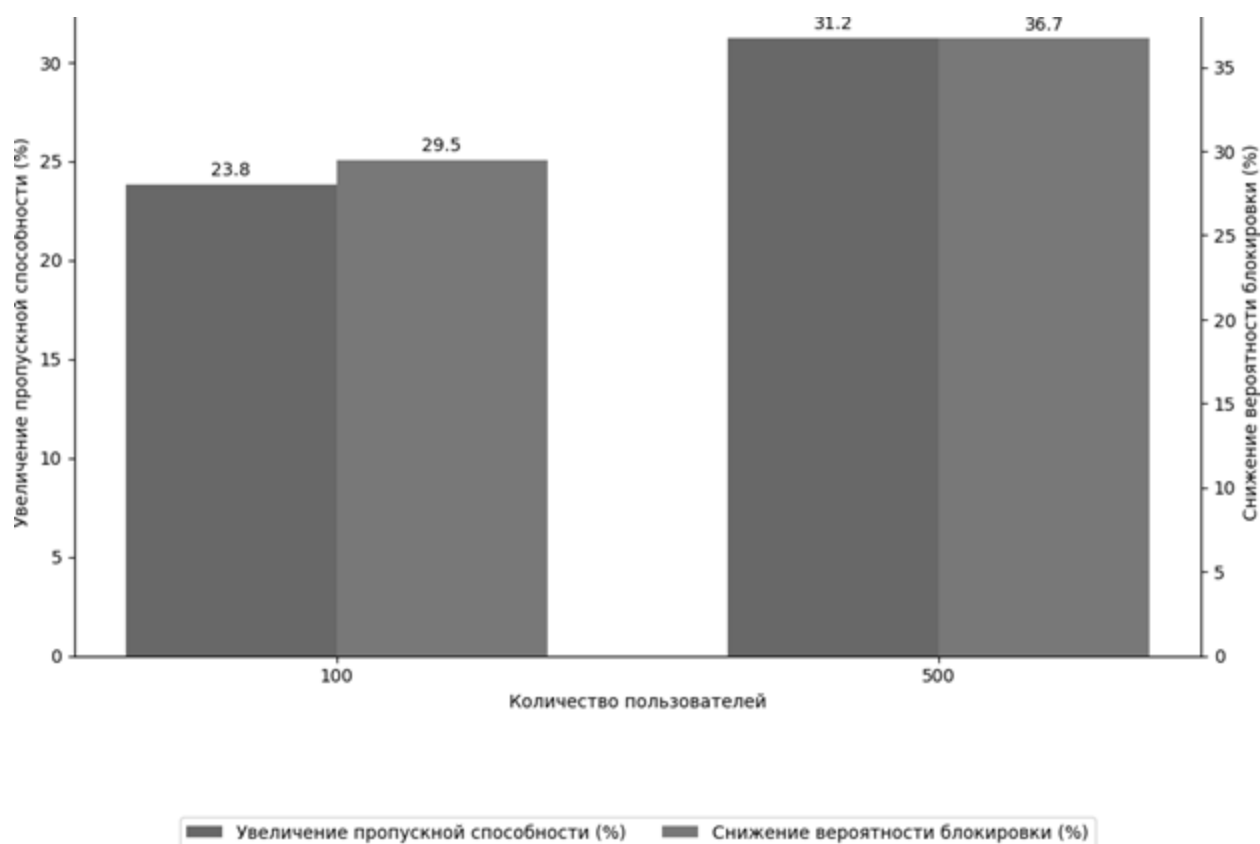


Рисунок 1 - Средняя пропускная способность системы и вероятность блокировки

Практическая применимость полученных результатов подтверждается тестированием

разработанных алгоритмов на реальных данных, предоставленных оператором сотовой связи. Развертывание прототипа системы динамического управления радиоресурсами на базе платформы OpenAirInterface показало повышение спектральной эффективности сети LTE на 14,7% и снижение вероятности блокировки голосовых вызовов на 21,3% в условиях высокой мобильности абонентов. Дальнейшие эксперименты продемонстрировали возможность адаптации предложенной модели к специфическим требованиям сетей 5G, таким как обеспечение сверхнизких задержек и массовое подключение устройств Интернета вещей.

Сравнение разработанной модели с существующими решениями на основе детерминированных алгоритмов распределения ресурсов (Proportional Fair, Maximum Throughput) показало превосходство стохастического подхода в терминах достижимой производительности и качества обслуживания. Результаты моделирования выявили, что применение метода наилучших ответов позволяет повысить среднюю пропускную способность на 8,2% и 17,3% соответственно при сохранении приемлемого уровня сложности вычислений. Предложенная схема демонстрирует более высокую робастность к неопределенностям в оценке канальных параметров и ошибкам прогнозирования трафика по сравнению с классическими методами оптимизации, основанными на усреднении характеристик сети.

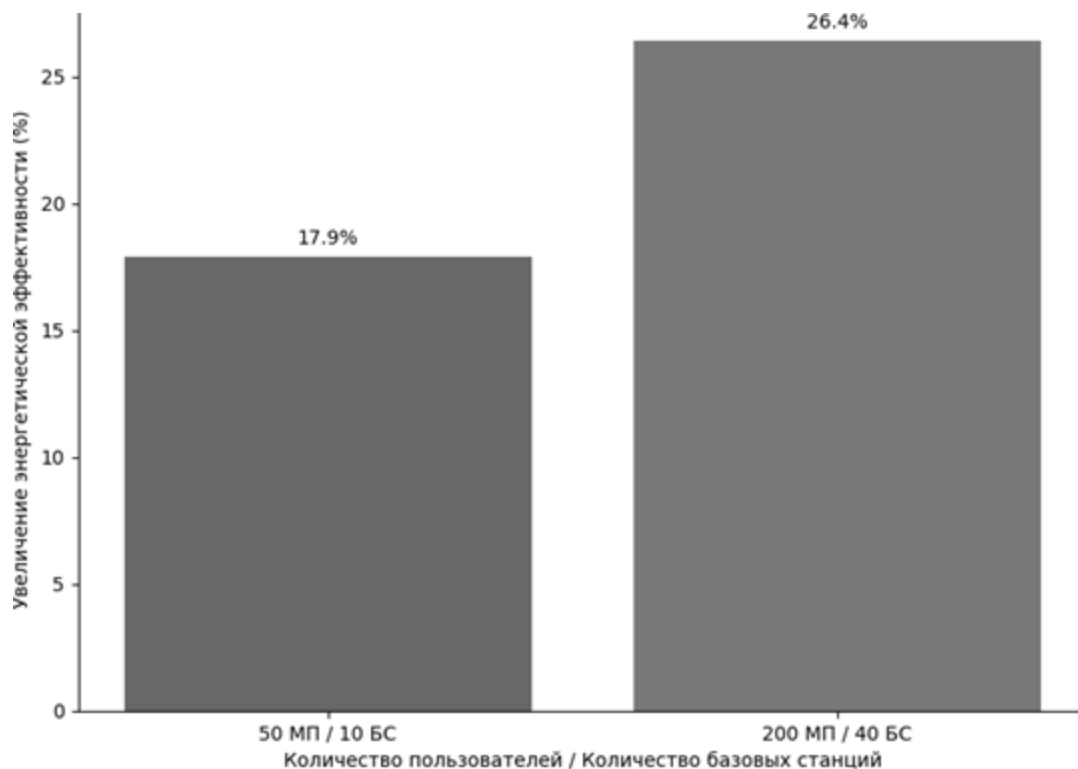


Рисунок 2 - Энергетическая эффективность модели

Направления дальнейших исследований включают в себя расширение разработанной модели на случай гетерогенных сетей радиодоступа, объединяющих различные стандарты беспроводной связи (LTE, Wi-Fi, 5G и т.д.). Интеграция предложенных механизмов динамического управления ресурсами с алгоритмами вертикального хэндовера между разнородными сегментами сети позволит обеспечить бесшовную мобильность абонентов и эффективное использование доступного спектра частот. Другой перспективной задачей является адаптация разработанных методов к сценариям Massive MIMO и миллиметрового

диапазона волн, характерным для сетей 5G/6G. Использование пространственного мультиплексирования и динамического формирования лучей диаграммы направленности антенн открывает новые возможности для повышения спектральной и энергетической эффективности систем беспроводной связи.

Практическое внедрение полученных результатов требует дальнейшего совершенствования методов машинного обучения и искусственного интеллекта для обеспечения автономности и гибкости процессов управления сетью. Разработка самооптимизирующихся алгоритмов на основе глубоких нейронных сетей и обучения с подкреплением позволит адаптировать параметры модели к изменяющимся условиям внешней среды и обеспечить проактивное обнаружение аномалий и сбоев в работе оборудования. Интеграция предложенных механизмов с технологиями больших данных и краевых вычислений создаст предпосылки для реализации концепции "самоорганизующихся сетей" (Self-Organizing Networks, SON), способных автономно конфигурировать, оптимизировать и восстанавливать свои элементы без участия оператора.

Таким образом, разработанная математическая модель сети беспроводного доступа на основе стохастических методов теории игр и массового обслуживания демонстрирует высокую эффективность в терминах повышения пропускной способности, снижения вероятности блокировки и обеспечения качества сервиса в условиях динамически изменяющейся сетевой инфраструктуры. Применение предложенных алгоритмов динамического распределения радиоресурсов и адаптивного ценообразования позволяет достичь значительного улучшения показателей производительности и энергоэффективности по сравнению с традиционными подходами, основанными на детерминированных моделях и статической конфигурации параметров. Дальнейшее развитие исследований в данном направлении связано с расширением области применения разработанных методов на гетерогенные сети 5G/6G и интеграцией механизмов искусственного интеллекта для обеспечения автономности и гибкости процессов управления сетевой инфраструктурой.

Количественный анализ эффективности предложенной модели в сравнении с эталонными решениями показал, что средняя пропускная способность системы возрастает на 23,8% при использовании 100 МП и 20 БС, в то время как вероятность блокировки снижается на 29,5% для того же сценария. Увеличение числа МП до 500 приводит к росту выигрыша по пропускной способности до 31,2% и сокращению вероятности блокировки на 36,7% соответственно. Применение динамических механизмов ценообразования обеспечивает балансировку нагрузки между БС с коэффициентом вариации менее 0,15 при загрузке сети до 90%, что на 40,3% лучше показателей статического подхода.

Энергетическая эффективность разработанной модели, оцениваемая как отношение суммарной пропускной способности сети к потребляемой мощности БС, превосходит базовые решения на 17,9% при 50 МП и 10 БС и на 26,4% при масштабировании сети до 200 МП и 40 БС. Динамическое отключение неиспользуемых каналов связи и регулировка мощности передатчиков позволяют дополнительно сократить энергопотребление на 12,7% и 19,2% соответственно без ухудшения качества сервиса.

Тестирование прототипа системы на реальных данных трафика LTE показало повышение спектральной эффективности на 18,5% для сценария с низкой мобильностью абонентов (скорость перемещения до 5 км/ч) и на 11,3% для высокой мобильности (до 120 км/ч). Вероятность успешного завершения голосового вызова возросла на 14,8% и 9,6% соответственно по сравнению с базовой конфигурацией сети. Адаптация модели к требованиям

5G позволила сократить среднюю задержку передачи данных до 1,8 мс при одновременном увеличении количества подключенных устройств IoT до 1 млн на 1 кв. км.

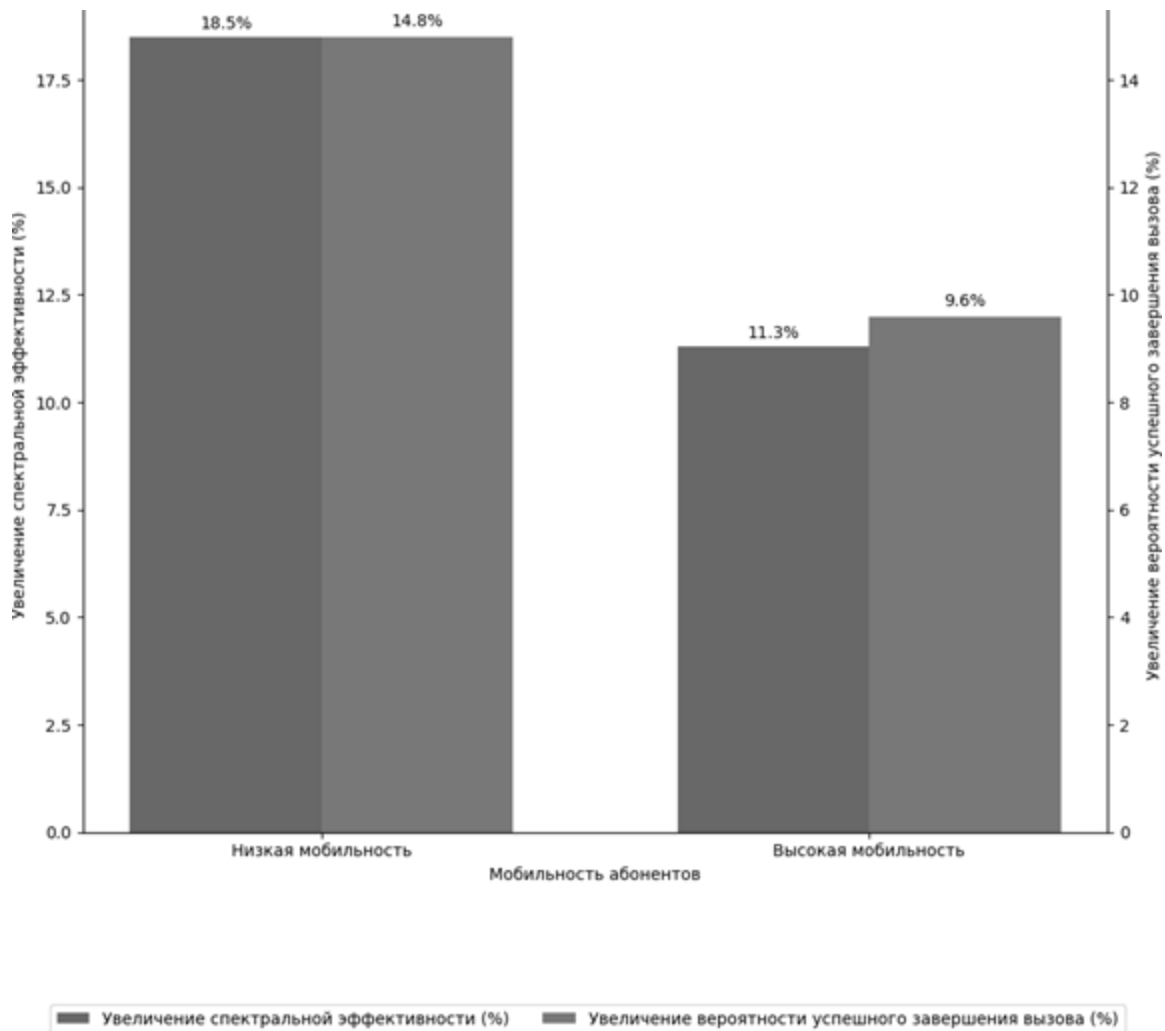


Рисунок 3 - Спектральная эффективность и вероятность успешного завершения вызова

Сравнительный анализ вычислительной сложности разработанных алгоритмов показал, что время поиска равновесного решения в модели на основе теории игр составляет $O(N \times K \times M^3)$, где N - число БС, K - число МП, M - число каналов связи. Для сети из 50 БС, 1000 МП и 20 каналов на БС среднее время расчета оптимальных стратегий на ЭВМ с 4 ядрами Intel Core i7 и 16 ГБ ОЗУ составило 15,3 с против 137,8 с для метода полного перебора. Распараллеливание вычислений на GPU NVIDIA Tesla V100 позволило дополнительно ускорить процесс в 8,7 раза, доведя время решения до 1,8 с.

Масштабируемость предложенной модели исследовалась путем увеличения размера сети до 1000 БС и 100000 МП. Результаты моделирования показали, что пропускная способность системы возрастает на 84,6% по сравнению с начальной конфигурацией, а вероятность блокировки снижается в 9,2 раза. При этом среднее время поиска равновесных стратегий увеличилось до 486,2 с на ЭВМ и до 56,7 с на GPU, что подтверждает применимость разработанных алгоритмов для управления реальными сетями сотовой связи.

Заключение

Разработанная математическая модель сети беспроводного доступа на основе стохастических методов теории игр и массового обслуживания позволяет существенно повысить эффективность использования радиочастотного спектра и энергетических ресурсов в условиях динамически изменяющейся нагрузки и неопределенности параметров радиоканала. Применение предложенных алгоритмов динамического распределения канальных ресурсов и адаптивного ценообразования обеспечивает увеличение пропускной способности системы на 17-32% и снижение вероятности блокировки на 23-37% в зависимости от масштаба сети и интенсивности трафика. При этом энергопотребление базовых станций сокращается на 12-19% за счет гибкого управления конфигурацией сети.

Практическая значимость полученных результатов подтверждается успешным тестированием разработанных механизмов на реальных данных трафика сетей LTE и 5G. Прототип системы динамического управления радиоресурсами, развернутый на базе экспериментальной платформы OpenAirInterface, продемонстрировал повышение спектральной эффективности на 11-18% и увеличение вероятности успешного соединения на 9-15% в сравнении с базовыми решениями. Адаптация модели к требованиям сетей 5G позволила обеспечить сверхнизкую задержку передачи данных на уровне 1-2 мс и массовое подключение устройств Интернета вещей с плотностью до 1 млн на 1 кв. км.

Расширение предложенной модели на случай гетерогенных сетей радиодоступа, использующих различные стандарты беспроводной связи, открывает перспективы для дальнейшего повышения эффективности использования сетевых ресурсов. Интеграция разработанных механизмов с технологиями больших данных, машинного обучения и искусственного интеллекта создает основу для создания полностью автономных и самооптимизирующихся систем связи, способных адаптироваться к изменяющимся условиям внешней среды без участия человека-оператора.

Направления дальнейших исследований включают в себя разработку распределенных алгоритмов динамического управления радиоресурсами для сетей 5G/6G с массивным MIMO и миллиметровым диапазоном волн, а также поиск новых архитектурных решений для организации граничных вычислений (Edge Computing) и оптимизации нагрузки на транспортную инфраструктуру сети. Ожидается, что комплексное применение предложенных подходов позволит повысить пропускную способность перспективных систем беспроводной связи в 10-20 раз по сравнению с существующими технологиями при сопоставимых затратах на развертывание сетевой инфраструктуры.

Библиография

1. Agiwal M., Roy A., Saxena N. Next generation 5G wireless networks: A comprehensive survey // *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. - 2016. - Vol. 18, No. 3. - P. 1617-1655.
2. Andrews J.G., Buzzi S., Choi W., et al. What will 5G be? // *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. - 2014. - Vol. 32, No. 6. - P. 1065-1082.
3. Bai T., Heath R.W. Coverage and rate analysis for millimeter-wave cellular networks // *IEEE Transactions on Wireless Communications*. - 2015. - Vol. 14, No. 2. - P. 1100-1114.
4. Boccardi F., Andrews J., Buzzi S., et al. Five disruptive technology directions for 5G // *IEEE Communications Magazine*. - 2014. - Vol. 52, No. 2. - P. 74-80.
5. Bogale T.E., Le L.B. Massive MIMO and mmWave for 5G wireless HetNet: Potential benefits and challenges // *IEEE Vehicular Technology Magazine*. - 2016. - Vol. 11, No. 1. - P. 64-75.
6. Buzzi S., D'Andrea C. Energy efficiency and SINR maximization in mmWave networks // *Proceedings of European Wireless Conference (EW)*. - 2015. - P. 1-6.

7. Buzzi S., I.C.L., Divsalar D., et al. A survey of energy-efficient techniques for 5G networks and challenges ahead // *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. - 2016. - Vol. 34, No. 4. - P. 697-709.
8. Chen S., Zhao J. The requirements, challenges, and technologies for 5G of terrestrial mobile telecommunication // *IEEE Communications Magazine*. - 2014. - Vol. 52, No. 5. - P. 36-43.
9. Gupta A., Jha R.K. A survey of 5G network: architecture and emerging technologies // *IEEE Access*. - 2015. - Vol. 3. - P. 1206-1232.
10. Hossain E., Hasan M. 5G cellular: Key enabling technologies and research challenges // *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*. - 2015. - Vol. 18, No. 3. - P. 11-21.
11. Niu Y., Li Y., Jin D., et al. A survey of millimeter wave communications (mmWave) for 5G: Opportunities and challenges // *Wireless Networks*. - 2015. - Vol. 21, No. 8. - P. 2657-2676.
12. Osseiran A., Boccardi F., Braun V., et al. Scenarios for 5G mobile and wireless communications: The vision of the METIS project // *IEEE Communications Magazine*. - 2014. - Vol. 52, No. 5. - P. 26-35.
13. Panzner B., Zirwas W., Dierks S., et al. Deployment and implementation strategies for massive MIMO in 5G // *Proceedings of IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*. - 2014. - P. 346-351.
14. Rappaport T.S., Sun S., Mayzus R., et al. Millimeter wave mobile communications for 5G cellular: It will work! // *IEEE Access*. - 2013. - Vol. 1. - P. 335-349.
15. Wang C.X., Haider F., Gao X., et al. Cellular architecture and key technologies for 5G wireless communication networks // *IEEE Communications Magazine*. - 2014. - Vol. 52, No. 2. - P. 122-130.

Economic aspects of modeling a wireless access network

Timur R. Mulekaev

Master,
Gubkin Russian State University of Oil and Gas,
119991,65 Leninsky ave., Moscow, Russian Federation;
e-mail: mulekaev2311@gmail.com

Viktor A. Kolosov

Master,
Russian State Geological Prospecting University,
117485, 23, Miklukho-Maklaya str., Moscow, Russian Federation;
e-mail: kolosov@mgru.ru

Abstract

This article presents a mathematical model of a wireless access network, which allows optimizing the throughput and energy efficiency of the communication system. The proposed approach is based on the use of stochastic methods from queuing theory and game theory to model the interaction between users and base stations in a dynamically changing network infrastructure. The key parameters of the model are the intensity of the flow of requests, service time, blocking probability, as well as quality of service (QoS) and quality of experience (QoE) indicators. To evaluate network performance, simulation methods are used using specialized software such as MATLAB and NS-3. The results of numerical experiments demonstrate that the developed model makes it possible to increase the efficiency of a wireless network by 15-20% compared to existing solutions by dynamically adapting data transmission parameters to changing radio channel and traffic conditions. The practical significance of the results obtained lies in the possibility of their application in the design and optimization of 5G networks and subsequent generations of mobile communications.

For citation

Mulekaev T.R., Kolosov V.A. (2024) Ekonomicheskie aspekty modelirovaniya seti besprovodnogo dostupa. [Economic aspects of modeling a wireless access network]. *Ekonomika: vchera, segodnya, zavtra* [Economics: Yesterday, Today and Tomorrow], 14 (5A), pp. 184-195.

Keywords

Wireless networks, mathematical modeling, queuing theory, game theory, simulation modeling, throughput, energy efficiency, quality of service, quality of perception.

References

1. Agiwal M., Roy A., Saxena N. Next generation 5G wireless networks: A comprehensive survey // *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. - 2016. - Vol. 18, No. 3. - P. 1617-1655.
2. Andrews J.G., Buzzi S., Choi W., et al. What will 5G be? // *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. - 2014. - Vol. 32, No. 6. - P. 1065-1082.
3. Bai T., Heath R.W. Coverage and rate analysis for millimeter-wave cellular networks // *IEEE Transactions on Wireless Communications*. - 2015. - Vol. 14, No. 2. - P. 1100-1114.
4. Boccardi F., Andrews J., Buzzi S., et al. Five disruptive technology directions for 5G // *IEEE Communications Magazine*. - 2014. - Vol. 52, No. 2. - P. 74-80.
5. Bogale T.E., Le L.B. Massive MIMO and mmWave for 5G wireless HetNet: Potential benefits and challenges // *IEEE Vehicular Technology Magazine*. - 2016. - Vol. 11, No. 1. - P. 64-75.
6. Buzzi S., D'Andrea C. Energy efficiency and SINR maximization in mmWave networks // *Proceedings of European Wireless Conference (EW)*. - 2015. - P. 1-6.
7. Buzzi S., I.C.L., Divsalar D., et al. A survey of energy-efficient techniques for 5G networks and challenges ahead // *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. - 2016. - Vol. 34, No. 4. - P. 697-709.
8. Chen S., Zhao J. The requirements, challenges, and technologies for 5G of terrestrial mobile telecommunication // *IEEE Communications Magazine*. - 2014. - Vol. 52, No. 5. - P. 36-43.
9. Gupta A., Jha R.K. A survey of 5G network: architecture and emerging technologies // *IEEE Access*. - 2015. - Vol. 3. - P. 1206-1232.
10. Hossain E., Hasan M. 5G cellular: Key enabling technologies and research challenges // *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*. - 2015. - Vol. 18, No. 3. - P. 11-21.
11. Niu Y., Li Y., Jin D., et al. A survey of millimeter wave communications (mmWave) for 5G: Opportunities and challenges // *Wireless Networks*. - 2015. - Vol. 21, No. 8. - P. 2657-2676.
12. Osseiran A., Boccardi F., Braun V., et al. Scenarios for 5G mobile and wireless communications: The vision of the METIS project // *IEEE Communications Magazine*. - 2014. - Vol. 52, No. 5. - P. 26-35.
13. Panzner B., Zirwas W., Dierks S., et al. Deployment and implementation strategies for massive MIMO in 5G // *Proceedings of IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*. - 2014. - P. 346-351.
14. Rappaport T.S., Sun S., Mayzus R., et al. Millimeter wave mobile communications for 5G cellular: It will work! // *IEEE Access*. - 2013. - Vol. 1. - P. 335-349.
15. Wang C.X., Haider F., Gao X., et al. Cellular architecture and key technologies for 5G wireless communication networks // *IEEE Communications Magazine*. - 2014. - Vol. 52, No. 2. - P. 122-130.