

Научная статья

УДК 621.396.9+004.94

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2025-11-5-84-96>

EDN:HFEDWC



Имитационная модель для исследования алгоритмов планирования радиоресурсов уровня доступа в сетях мобильной связи

- ✉ Кирилл Игоревич Брагин¹, bragik.irl@yandex.com
Иван Алексеевич Норицин², defenderivan2015@gmail.com
Вера Геннадьевна Дроздова¹, drozdova@sibguti.ru

¹Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Новосибирск, 630102, Российская Федерация

²ООО «Ядро Центр Технологий Мобильной Связи», Санкт-Петербург, 195160, Российская Федерация

Аннотация

Эффективное планирование радиоресурсов на уровне доступа к среде является критически важной задачей для обеспечения качества обслуживания в мобильных сетях. Перспективным направлением становится использование машинного обучения и искусственного интеллекта для решения задачи планирования на MAC-уровне. Существующие универсальные симуляторы (MATLAB, ns-3, OMNeT++) мало оптимизированы для глубокого исследования алгоритмов планирования ресурсов и имеют ограничения при их интеграции.

Целью настоящей статьи является разработка специализированной имитационной модели планирования ресурсов сети LTE (Long Term Evolution) на уровне доступа для исследования классических и интеллектуальных алгоритмов планирования.

Сущность предлагаемого решения заключается в создании модульной имитационной модели, включающей различные модели мобильности пользователей, распространения радиосигналов, генерации трафика и классические алгоритмы планирования (Round Robin, Proportional Fair, Best CQI). Модель специализируется на детальной разработке процессов MAC-уровня. Система реализована на языке Python с модульной архитектурой, обеспечивающей интеграцию алгоритмов на базе машинного обучения и искусственного интеллекта. Исходный код размещен в открытом репозитории GitHub.

Эксперименты проводились для имитационного сценария бесконечного буфера, тремя пользователями различных классов мобильности в городской среде. Испытывались три классических алгоритма планирования с оценкой пропускной способности, индекса справедливости Джейна и спектральной эффективности.

Научная новизна решения состоит в создании специализированной имитационной модели, оптимизированной для исследования алгоритмов планирования MAC-уровня с возможностью интеграции методов машинного обучения и обеспечивающей гибкость настройки различных сценариев моделирования.

Теоретическая значимость заключается в расширении инструментария для исследования алгоритмов планирования ресурсов мобильных сетей и создании основы для разработки интеллектуальных планировщиков.

Практическая значимость состоит в предоставлении исследователям специализированного инструмента для разработки, тестирования и сравнения алгоритмов планирования, а также в возможности адаптации модели для сетей 5G / 6G и интеграции планировщиков с учетом качества обслуживания.

Ключевые слова: LTE, планирование ресурсов, MAC-уровень, имитационное моделирование, планировщик


Ссылка для цитирования: Брагин К.И., Норицин И.А., Дроздова В.Г. Имитационная модель для исследования алгоритмов планирования радиоресурсов уровня доступа в сетях мобильной связи // Труды учебных заведений связи. 2025. Т. 11. № 5. С. 84–96. DOI:10.31854/1813-324X-2025-11-5-84-96. EDN:HFEDWC


Original research


<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2025-11-5-84-96>

EDN:HFEDWC

Simulation Model for Radio Resource Scheduling Algorithms at MAC Layer of Mobile Networks

 Kirill I. Bragin¹✉, bragik.irl@yandex.com

 Ivan A. Noritsin², defenderivan2015@gmail.com

 Vera G. Drozdova¹, drozdova@sibguti.ru

¹Siberian State University of Telecommunications and Information Science,
Novosibirsk, 630102, Russian Federation

²YADRO Center of Mobile Communication Technologies, LLC,
St. Petersburg, 195160, Russian Federation

Annotation

Effective radio resource scheduling at the Medium Access Control (MAC) layer is a critically important task for ensuring quality of service in mobile networks. The use of machine learning and artificial intelligence for MAC-layer scheduling is becoming a promising direction. Existing general-purpose simulators (MATLAB, ns-3, OMNeT++) are insufficiently optimized for in-depth research of resource scheduling algorithms and have limitations in their integration.

The purpose of this article is to develop a specialized simulation model for LTE (Long Term Evolution) network resource scheduling at the MAC layer for investigating both classical and intelligent scheduling algorithms.

The core of the proposed solution lies in creating a modular simulation model that incorporates different user mobility models, radio propagation models, traffic generation models, and classical scheduling algorithms (Round Robin, Proportional Fair, Best CQI). The model specializes in detailed simulation of MAC-layer processes. The system is implemented in Python with modular architecture enabling integration of machine learning and artificial intelligence-based algorithms. The source code is hosted in an open GitHub repository.

Experiments were conducted for an infinite buffer simulation scenario with three users from different mobility classes in an urban environment. Three classical scheduling algorithms were tested with evaluation of throughput, Jain's fairness index, and spectral efficiency.

The scientific novelty of the solution lies in creating a specialized simulation model optimized for investigating MAC-layer scheduling algorithms with the capability to integrate machine learning methods and providing flexibility in configuring various simulation scenarios.

The theoretical significance consists in expanding the toolkit for studying mobile network resource scheduling algorithms and establishing a foundation for developing intelligent schedulers.

The practical significance is providing researchers with a specialized tool for developing, testing, and comparing scheduling algorithms, as well as the ability to adapt the model for 5G/6G networks and integrate quality-of-service-aware schedulers.

Keywords: LTE, resource scheduling, MAC layer, simulation modeling, scheduler

For citation: Bragin K.I., Noritsin I.A., Drozdova V.G. Simulation Model for Radio Resource Scheduling Algorithms at MAC Layer of Mobile Networks. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2025;11(5):84–96. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2025-11-5-84-96. EDN:HBVZAJ

1. ВВЕДЕНИЕ

Пропускная способность мобильных сетей связи зависит от множества факторов, включающих состояние канала передачи данных, применение передовых методов модуляции и технологий эффективного использования частотного спектра. Максимально достижимая теоретическая пропускная

способность канала описывается пределом Шеннона и в настоящий момент существует ряд препятствий, не позволяющих системам мобильной связи приблизиться к нему [1]. Первое направление – борьба с шумом и интерференцией в канале, для этого разрабатываются новые виды модуляции, а также помехоустойчивые методы кодирования.

Второе направление – развитие многоантенных систем, что может увеличить емкость за счет пространственных потоков передачи данных и уменьшить взаимные помехи с внедрением технологий направления луча (beamforming), однако идеальное разделение пространственных потоков является сложной задачей из-за ограничения физического размера устройств и взаимного влияния антенн. Третье направление – динамическая адаптация к изменениям среды передачи, на которую влияют передвижение абонентов и погодные условия (что весьма актуально для миллиметровых волн). Особую роль играет также планирование ресурсов на уровне доступа к среде, продвинутое алгоритмы представляющие комплексное решение вопросов справедливости распределения ресурсов между пользователями, снижения задержек для чувствительных к времени сервисов, энергоэффективности и др., что также влияет на общую пропускную способность канала, достигаемую в единицу времени.

Совершенствование механизмов планирования ресурсов в мобильной сети связи актуально и оправдано, так как это решает фундаментальную задачу повышения эффективности, качества и адаптивности беспроводных сетей. Эффективные алгоритмы планирования позволяют адаптивно распределять ресурсы между пользователями, в зависимости от состояния канала, нагрузки и приоритетов трафика (учет QoS), тем самым увеличивая суммарную производительность и спектральную эффективность [2]. С развитием сетей пятого и шестого поколений (5G и 6G) возникают новые сценарии использования ресурсов, где требуются специализированные подходы к планированию. Современные исследования охватывают интеграцию методов глубокого и машинного обучения (ML, аббр. от англ. Machine Learning) в задаче планирования, что позволяет реализовать более гибкие и адаптивные схемы управления ресурсами [3].

Разработка эффективных методов планирования позволит решить вопросы оптимизации алгоритмов для разнородного трафика, динамически изменяющихся нагрузки сети и состояния канала. Для безопасного тестирования и охвата различных сценариев работы сети, в том числе экстремальных, используются имитационные модели. Они позволяют исследовать поведение планировщиков в различных состояниях системы, гибко изменять и настраивать их параметры, проверять различные гипотезы и испытывать новые методы, ускоряя разработку алгоритмов планирования нового поколения.

Для имитационного моделирования сетей мобильной связи на текущий момент могут использоваться такие инструменты, как MATLAB, ns-3, OMNet++, которые представляют универсальные

платформы общего назначения, ориентированные на моделирование широкого спектра сетевых протоколов и технологий. Однако универсальные симуляторы, при всех их достоинствах, не оптимизированы для глубокого исследования специфики алгоритмов планирования ресурсов. Их архитектура создает вычислительные накладные расходы и ограничивает возможности реализации гибридных подходов, включающих использование интеллектуальных алгоритмов на базе ML [4]. Также важно уделить внимание оптимизации производительности как самих алгоритмов, так и имитационной модели, которая может быть перегружена вычислениями на уровнях помимо MAC и PHY (MAC, аббр. от англ. Medium Access Control; PHY, аббр. от англ. Physical Layer) [5]. Поддержка уникальных сценариев и бенчмарков работы планировщиков, включая интеграцию с ML-алгоритмами и алгоритмами на базе искусственного интеллекта (AI, аббр. от англ. Artificial Intelligence), позволит выявить новые закономерности в поведении интеллектуальных систем планирования и обеспечить их дальнейшую адаптацию к сетям мобильной связи, включая новые поколения (5G / 6G).

В рамках данной статьи представлена имитационная модель планирования ресурсов сети LTE на уровне доступа к среде, интегрирующая классические алгоритмы, такие как Round Robin (RR), Proportional Fair (PF) и Best CQI (аббр. от англ. Channel Quality Indicator), готовая к исследованию подходов на основе ML. Классические алгоритмы используются для валидации корректности модели и формирования базы для последующего сравнения с DRL-планировщиками (аббр. от англ. Deep Reinforcement Learning). Для обеспечения необходимого уровня правдоподобности результаты исследования работы алгоритмов планирования ресурсов были сопоставлены с последними исследованиями в этом направлении.

Ключевой особенностью разработанной модели является ее архитектура, специально спроектированная для многофункционального, масштабного исследования и разработки алгоритмов планирования ресурсов, в особенности интеллектуальных, основанных на методах ML и AI. Современные исследования демонстрируют значительный потенциал применения DRL-планировщиков. Модель предоставляет гибкую среду для дальнейшей интеграции таких методов, что критически важно для развития сетей следующих поколений. В отличие от существующих симуляторов общего назначения, которые ориентированы на широкий спектр сетевых протоколов, предложенная имитационная модель специализируется на детальном моделировании процессов планирования ресурсов на уровне MAC. Это позволит исследователям сосредоточиться на разработке и тестировании сложных алгоритмов

без накладных расходов на моделирование других уровней. Модульная архитектура обеспечивает возможность быстрого прототипирования ML / AI-алгоритмов, их сравнения с классическими решениями и тестировании в различных сценариях.

Классические алгоритмы планирования, представленные Round Robin, Proportional Fair, Best CQI, выполняют роль эталонных решений для валидации корректности работы имитационной среды и служат базой для сравнения с перспективными разработками. Их использование обусловлено необходимостью подтверждения адекватности модели и соответствия результатов теоретическим ожиданиям и данным других симуляторов, что является ключевым этапом перед внедрением более сложных решений и обеспечивает гибкость по сравнению с универсальными симуляторами.

2. АРХИТЕКТУРА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ

2.1. Общая информация по планированию ресурсов на уровне MAC

Уровень доступа к среде (MAC-уровень) в сетях мобильной связи играет ключевую роль, обеспечивая эффективное распределение радиоресурсов между пользователями. Структура, основной функционал и действующие процедуры уровня MAC описаны в технической спецификации 3GPP TS 36.321 [6]. Функции уровня включают распределение ресурсных блоков (RB, *аббр. от англ.* Resource Block) частотно-временной сетки по технологии OFDMA (*аббр. от англ.* Orthogonal Frequency Division Multiple Access) в направлении Downlink Scheduling (DL) и технологии SC-FDMA (*аббр. от англ.* Single Carrier Frequency Division Multiple Access) в направлении Uplink Scheduling (UL), учет таких параметров как CQI, состояние буфера, а также механизм повторной передачи пакетов Hybrid ARQ (HARQ). В планировании ресурсов важную роль играет и уровень PHY, который регламентируется TS 36.213 [7], определяющий механизмы формирования ресурсной сетки, ее структуру и параметры. На PHY происходит измерение качества канала, получение отношения сигнал / шум+интерференция (SINR, *аббр. от англ.* Signal to Interference + Noise Ratio), что влияет на выбор схемы модуляции и кодирования, напрямую определяющих пропускную способность. Сигнализация на этом уровне позволяет пользовательским терминалам знать информацию о запланированных ресурсах, а адаптивная модуляция обеспечивает подстройку канала под изменяющиеся условия среды. Именно уровни PHY и MAC формируют основу для динамического планирования ресурсов и влияют на качество обслуживания абонентов.

Для приближения модели к реальным условиям работы сети требуется реализовать логику изменения состояния канала. Например, имитация мобиль-

ности абонентов осуществляется с помощью математических моделей передвижения, а имитировать изменение параметров канала позволяют модели распространения радиосигналов. Если речь идет о распределении ресурсов, то необходимо понимать, какой объем этих ресурсов будет необходим пользователю, поэтому буфер пользователя будет заполняться за счет моделей генерации трафика. Кроме того, исследователями часто используются принципиальные модели обработки трафика и буфера – Full Buffer и Bursty Traffic [8]. Они применяются в различных сценариях планирования ресурсов. Например, Full Buffer подразумевает, что буфер пользователя никогда не пустеет, и он запрашивает максимально возможное количество ресурсов, которое может предоставить сеть. Bursty Traffic использует модели генерации трафика для имитации неравномерного поступления пакетов в буфер, чередуя периоды активности и простоя, что используется для более реалистичного моделирования пользовательского поведения.

2.2. Схема имитационной модели.

Модули базовой станции и пользователя

Опираясь на технические спецификации 3GPP и существующие исследования планировщиков в других средах моделирования [2–7], определена архитектура имитационной модели, удовлетворяющая вышеперечисленные требования (рисунок 1).

Рассмотрим подробно элементы структурной схемы имитационной модели. В сетях мобильной связи планирование осуществляется в двух направлениях: DL, канал передачи от базовой станции к пользователю, и UL, от пользователя к базовой станции. Таким образом, планировщики должны работать в обоих направлениях.

Основу модели составляет модуль базовой станции (BS module, *от англ.* Base Station Module), функционирующий с модулем планировщика (Scheduler) и ресурсной сетки (Resource Grid), а также модуль пользовательских устройств (UE module, *от англ.* User Equipment Module). Для хранения данных в модулях реализованы буферы, за счет чего модули структурно похожи друг на друга, но отличаются функционалом и атрибутами. Например, буфер базовой станции рассчитан на работу с несколькими пользователями, точнее очередями, и обладает большой емкостью, в то время как буфер обычного пользователя ограничен в объеме, поэтому, чтобы не допустить его переполнения при планировании ресурсов, используется специальный отчет Buffer Status Report, данными из которого пользуются планировщики.

UE module позволяет создавать и гибко настраивать требуемое количество экземпляров, которые будут задействованы в симуляции. Внутри модуля осуществляется сбор информации о состоянии

канала, буфера и другой служебной информации, которую затем получает планировщик. Для каждого устройства в симуляции можно назначить модели канала (Channel Model), мобильности (Mobility Model) и генерации трафика (Traffic Model). Из особенностей работы с модулем, которые не встречаются в других симуляторах, можно отметить возможность настройки условного класса пользователя по типу «пешеход», «автомобиль», «велосипедист», «внутри зданий». Планируется дальнейшее

расширение, чтобы представить стационарные устройства по типу IoT. Экземпляры можно настраивать каждый в отдельности или создавать коллекции, состоящие из множества экземпляров, объединенных общими признаками. Таким образом, модели в симуляции могут настраиваться не только глобально, но и учитывать частные случаи, что повышает достоверность симуляции и приближенность к реальным условиям.

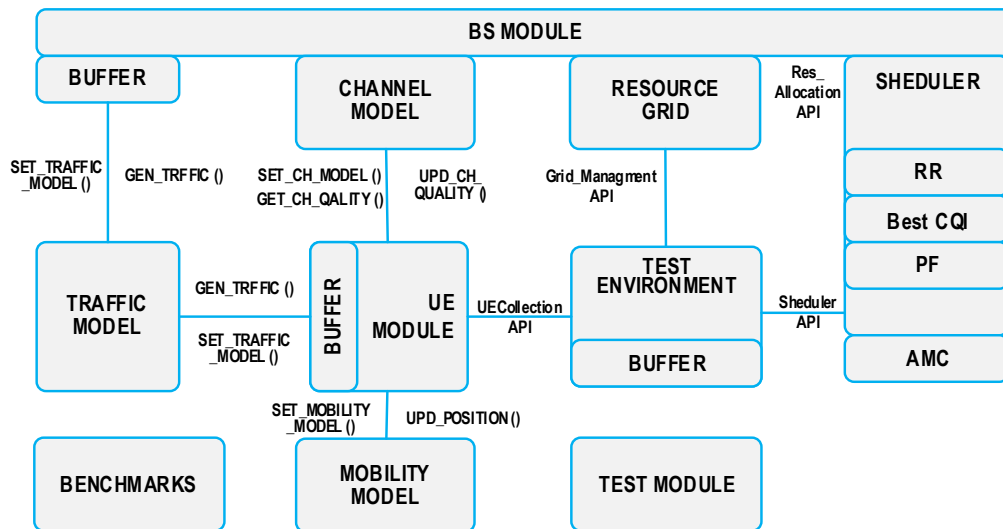


Рис. 1. Блочная структурная схема имитационной модели

Fig. 1. Simulation Model Block Architecture

2.3. Модели мобильности

В целях обеспечения динамического изменения состояния канала во времени необходимо симулировать передвижение абонентов относительно базовой станции. Для этой задачи применяются математические модели передвижения пользователей, которые представлены в Mobility Model. В перечень реализованных моделей вошли: Random Walk, Random Waypoint, Random Direction, Gauss-Markov Model. Их можно разделить на те, которые используются в закрытой местности, например, в зданиях, и – в открытой.

Random Walk определяет случайное направление и скорость движения (изменения координат). Каждое новое положение пользовательского устройства рассчитывается за постоянный интервал времени или за постоянное пройденное расстояние, в конце которого вычисляется новое направление и скорость. При достижении границ симулируемого пространства происходит «отскок» и изменение направления. Эта модель передвижения без памяти (не хранит историю предыдущих местоположений), что может порождать нереалистичные движения.

Random Waypoint включает в себя понятие паузы между изменениями направления движения

и / или скорости. Перед тем, как начать движение, пользователь остается на месте в течении определенного времени, а по его истечении выбирает случайный пункт назначения и движется к нему с заданной скоростью. По прибытии пользователь снова выдерживает паузу, прежде чем начать движение.

Random Direction аналогична модели Random Walk, однако отличается поведение при достижении границы симуляции, после которого выдерживается пауза и выбирается новое случайное направление.

Gauss-Markov – модель Гаусса – Маркова для передвижения абонента так, чтобы адаптироваться к различным уровням случайности с помощью определенного параметра настройки. Изначально каждому устройству присваивается текущая скорость и направление движения. Через фиксированные промежутки времени происходит обновление скорости и направления движения. В частности, значение скорости и направления для n -го момента времени рассчитывается на основе значения скорости и направления в $(n - 1)$ -й момент времени. Подробный анализ этих моделей представлен в исследовании [9, 10].

Реализация модели Гаусса – Маркова математически описывается выражениями (1, 2).

$$\begin{aligned} u_n &= \alpha \cdot u_{n-1} + (1 - \alpha) \cdot \bar{u} + \sqrt{1 + \alpha^2} \cdot u_x, \\ \theta_n &= \alpha \cdot \theta_{n-1} + (1 - \alpha) \cdot \bar{\theta} + \sqrt{1 + \alpha^2} \cdot \theta_x, \\ \alpha &\in [0,1], \end{aligned} \quad (1)$$

где u_n – скорость устройства для момента времени n ; θ_n – направление движения устройства в момент времени n ; α – параметр настройки для изменения случайности; \bar{u} – среднее значение скорости; $\bar{\theta}$ – среднее значение направления; u_x, θ_x – случайные значения из Гауссовского распределения.

В каждом временном интервале следующее значение координат рассчитывается на основе текущего местоположения, скорости и направления, например, для момента n координаты рассчитываются следующим образом:

$$\begin{aligned} x_n &= x_{n-1} + u_n \cdot \cos\theta_n, \\ y_n &= y_{n-1} + u_n \cdot \sin\theta_n, \end{aligned} \quad (2)$$

где x_n, x_{n-1} – координаты X устройства в момент времени n и $n - 1$, соответственно; y_n, y_{n-1} – координаты Y устройства в момент времени n и $n - 1$, соответственно; u_n – скорость устройства для момента времени n ; θ_n – направление движения устройства в момент времени n .

Чтобы гарантировать, что устройство не останется вблизи края области симуляции в течение длительного времени, они оттесняются, когда находятся на определенном расстоянии от краев. Визуализацию передвижения пользователя, согласно данной модели, можно рассмотреть на рисунке 2.

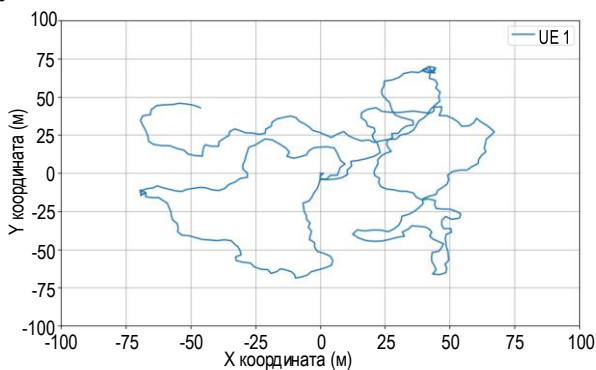


Рис. 2. Передвижение абонента в среде симуляции согласно модели Гаусса – Маркова

Fig. 2. User Mobility in Simulation Environment According to the Gauss – Markov Model

$$\begin{aligned} PL_{UMa-LOS} &= \begin{cases} PL_1 = 28 + 22 \cdot \log_{10}(d_{3D}) + 20 \cdot \log_{10}(f_c) \\ PL_2 = 28 + 40 \cdot \log_{10}(d_{3D}) + 20 \cdot \log_{10}(f_c) - 9 \cdot \log_{10}((d'_{BP})^2 + (h_{BS} - h_{UT})^2) \end{cases} \\ PL_1 &\in [10m \leq d_{2D} \leq d'_{BP}], \\ PL_2 &\in [d'_{BP} \leq d_{2D} \leq 5 km]. \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} PL_{UMa-NLOS} &= \max(PL_{UMa-LOS}, PL'_{UMa-NLOS}), \\ PL'_{UMa-NLOS} &= 13,54 + 39,08 \log_{10}(d_{3D}) + 20 \log_{10}(f_c) - 0,6(h_{UT} - 1,5). \end{aligned} \quad (4)$$

2.4. Модели распространения радиосигналов

Модели распространения сигнала являются важнейшей частью симуляции мобильных сетей связи. С их помощью определяется уровень потерь на трассе между пользовательским устройством и базовой станцией, что в дальнейшем используется при вычислении SINR и метрики качества канала CQI. Модели распространения радиосигналов подробно описаны в спецификации 3GPP TR 38.901 [11].

Определяют следующие типы моделей:

- RMa (аббр. от англ. Rural Macro) – сельская макросотовая зона;
- UMa (аббр. от англ. Urban Macro) – городская макросотовая зона;
- UMi (аббр. от англ. Urban Micro) – городская микросотовая зона.

Каждая из перечисленных моделей определяется математическим описанием для расчета затухания радиосигнала (PL, аббр. от англ. Path Loss) и вероятности прямой видимости базовой станции (LOS, аббр. от англ. Line of Sight). Важно отметить, что данные модели учитывают нахождение абонента на открытом воздухе либо в помещении или в машине. Приведенные модели являются статистическими, они созданы на основе экспериментальных данных, полученных в различных условиях. Для примера рассмотрим расчет PL модели UMa.

Сценарий прямой видимости описывается выражением (3), где PL_1 – потери на расстояниях до точки разрыва (breakpoint distance), дБ; PL_2 – потери пути на расстояниях после точки разрыва, дБ; d_{3D}, d_{2D} – расстояние от антенны пользователя и от базовой станции, соответственно, до базовой станции, км; f_c – центральная частота, Гц; h_{BS} – высота антенны базовой станции, м; h_{UT} – высота антенны пользователя, м; d_{BP} – расстояние точки излома, на котором изменяется характер распространения сигнала:

$$d_{BP} = \frac{2\pi h_{BS} h_{UT} f_c}{c},$$

где c – скорость света, м/с.

Для случая отсутствия прямой видимости (NLOS, аббр. от англ. Non Line of Sight) характерно выражение (4).

Далее, в модели UMa (а также RMa, UMi), критически важным является расчет вероятности LOS базовой станции. Это играет важную роль в реалистичном моделировании, так как LOS- и NLOS-сценарии имеют принципиально разное затухание. Эти параметры рассчитываются по выражению (5).

$$Pr_{LOS} = \begin{cases} 1 & , d_{2D-out} \leq 18 \text{ m} \\ \left[\frac{18}{d_{2D-out}} + \exp\left(-\frac{d_{2D-out}}{63}\right) \left(1 - \frac{18}{d_{2D-out}}\right) \right] \left(1 + C'(h_{UT}) \frac{5}{4} \left(\frac{d_{2D-out}}{100}\right)^3 \exp\left(-\frac{d_{2D-out}}{150}\right) \right) & , 18 \text{ m} < d_{2D-out} \end{cases} \quad (5)$$

$$C'(h_{UT}) = \begin{cases} 0 & , h_{UT} \leq 13 \text{ m} \\ \left(\frac{h_{UT} - 13}{10}\right)^{1.5} & , 13 \text{ m} < h_{UT} \leq 23 \text{ m} \end{cases}$$

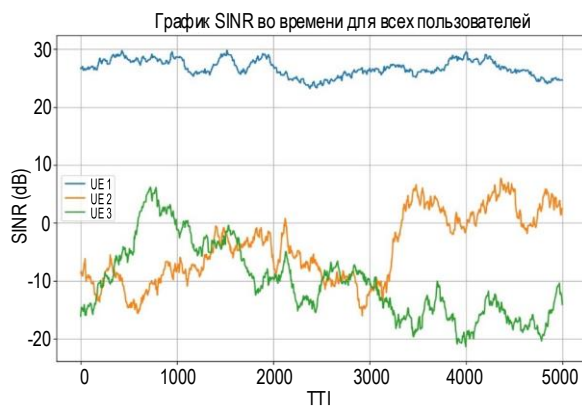


Рис. 3. График изменения SINR во время симуляции для трех абонентов. Модель UMi

Fig. 3. SINR Variation During Simulation for Three Subscribers. UMi Model

2.5. Генерация трафика

Как было упомянуто ранее, существует два основных сценария для исследования работы планировщиков – Full Buffer и Bursty Traffic. В первом случае данные заполняют весь буфер пользовательского устройства, и планировщик оперирует условно бесконечными данными. Абоненты не исчезают из симуляции и постоянно находятся в ней. Это удобно в случае, когда необходимо проверить общее функционирование алгоритма планирования или нагрузить его. Для более реалистичного моделирования может использоваться сценарий Bursty Traffic, в котором трафик генерируется периодически, что удобно при симуляции устройств IoT, разнородного трафика по типу телефонии или потоковых сервисов. Для этого в модуле Traffic Model предусмотрены такие математические модели трафика как распределение Пуассона, ON / OFF, а также стохастическая модель MMPP (аббр. от англ. Markov-Modulated Poisson Process), объединяющая марковские процесс с пуассоновской генерацией [12, 13]. В данной статье для демонстрации работы имитационной модели будет использован сценарий Full Buffer, в связи с чем описание существующих моделей трафика решено опустить.

Затем при использовании UMi (и других моделей канала) в комбинации с любой моделью мобильности можно получить изменения затухания в канале за время симуляции (PL), что позволяет построить графики SINR для каждого пользователя (рисунок 3).

2.6. Модуль планировщика

В имитационной модели планировщик тесно связан с модулем базовой станции, ресурсной сетки и адаптивно-кодовой модуляции (AMC, аббр. от англ. Adaptive Coding Modulation). Именно здесь реализованы такие алгоритмы планирования, как RR, PF и Best CQI. В дальнейшем планируется пополнить список алгоритмов, например, ориентированных на работу с QoS-трафиком, и решения, основанные на ML.

На момент написания статьи, планировщик способен работать в режиме планирования DL или UL канала. В качестве эксперимента выбран первый. Основная задача планировщика – выделение ресурсов пользователю, по мере требования. В качестве ресурса выступают ресурсные блоки частотно-временной сетки. Алгоритм осуществляет распределение RB за один временной интервал (TTI, аббр. от англ. Transmission Time Interval), длящийся 1 мс и состоящий из двух слотов, по одному RB на поднесущую в слоте.

Для эффективности и быстродействия применяется понятие ресурсной группы (RBG, аббр. от англ. Resource Block Group), размеры которой зависят от ширины полосы, например, для полосы шириной 10 МГц используется размер группы, равный 3 RB, причем группа выделяется параллельно в обоих слотах. Данный механизм регулируется 3GPP TS 36.213 и называется Resource Allocation Type 0 [6]. Тип распределения ресурсов позволяет обеспечить необходимую гибкость работы с ресурсами и уменьшить количество служебной информации, представляемой в виде битовой карты (bitmap) распределения, которая необходима для того, чтобы пользовательские устройства понимали, на каких поднесущих необходимо ожидать предназначенные им RBG.

В процедуру планирования DL на примере алгоритма RR входят такие этапы как:

- получение информации о состоянии сети, количестве активных пользователей и наличии данных для передачи, доступных ресурсах на текущий TTI;

- формирование очереди пользователей в соответствии с внутренним порядком (для RR);
- выделение RBG происходит через циклическую очередь;
- выделение необходимого количества доступных RBG, перераспределение оставшихся блоков (если таковые имеются) текущим активным пользователям;
- формирование и отправка служебной информации и команд, для чего используется DCI (аббр. от англ. Downlink Control Information), в которой указывается количество выделенных RB, параметры модуляции и кодирования;
- обновление состояния, переход к следующему циклу, обновление данных о буфере, обслуженных пользователях, статистика.

Совместно с планировщиком работает механизм AMC, отвечающий за динамическую адаптацию па

раметров передачи под текущие условия канала. При ухудшении SINR происходит понижение схемы модуляции для уменьшения вероятности возникновения ошибок и, как следствие, уменьшения количества повторных передач и вызова процесса HARQ. Планировщик использует данные от AMC для определения емкости RB. Это напрямую влияет на пропускную способность как каждого пользователя, так и соты в целом (чем больше модуляция, тем большее количество бит передается в TTI), на минимизацию задержек и выбросов (dropout), и даже на индекс справедливости выделения ресурсов, так как может снижать дисбаланс между пользователями на краю соты и вблизи базовой станции. Пример визуализации ресурсной сетки в ходе симуляции работы планировщика на основе RR можно увидеть на рисунке 4.

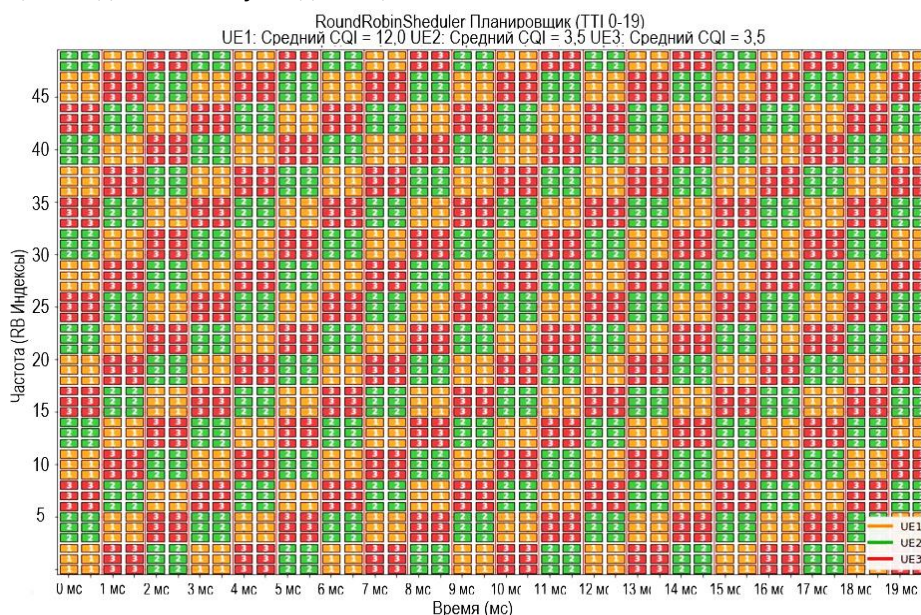


Рис. 4. Визуализация распределения ресурсных блоков для полосы 10 МГц. Планировщик Round Robin

Fig. 4. Resource Block Allocation for 10 MHz Band. Round Robin Scheduler

2.7. Вспомогательные модули

Помимо основных модулей, в программном решении представлены вспомогательные компоненты. Один из них – среда тестирования (Test Environment), предназначенный для создания различных экспериментов, связывания всех модулей в единой точке входа и получение детальной информации об их работе, а также отрисовка графиков с помощью «Visualizer». Все графики, представленные ранее, были получены с помощью данного модуля. Среда тестирования позволяет гибко настраивать параметры эксперимента, оперирует пользовательскими устройствами, параметрами базовой станции и ресурсной сетки.

Модуль тестов (Test Module) – технический модуль, используемый для отладки и тестирования

остальных компонентов, проверки их работоспособности и краевых условий функционирования. А также для валидации результатов, получаемых в ходе работы имитационной модели, сравнение с техническими нормами и допусками 3GPP и другими симуляторами.

В разработке находится модуль бенчмарков (Benchmarks), который будет использоваться для быстрого доступа к разнообразным сценариям работы имитационной модели посредством скриптов. Например, нагрузочное тестирование планировщика большим количеством пользователей, генерация разнородного трафика (в том числе, чувствительного к задержкам), большое количество мобильных абонентов на автомобилях, стационарные сценарии с симуляцией передвижения в рамках зданий [14, 15].

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ПЛАНИРОВАНИЯ РЕСУРСОВ

3.1. Параметры симуляции

В рамках данной статьи производится экспериментальная проверка планирования ресурсов на нисходящей линии (DL) для сети LTE. Для симуляции используется детальное моделирование перемещений абонентов, а также затуханий в канале связи. Всего выбрано три классических планировщика: RR, PF и Best CQI. Применяется Full buffer сценарий нагрузки планировщиков. HARQ отключен, однако используется динамическая адаптация модуляции и кодовых схем согласно отчетам о CQI и состоянию канала (посредством вычисления SINR).

Симуляция выполнялась на персональном компьютере с процессором Intel Xeon E5-2470, в наличии 16 Гбайт оперативной памяти, под управлением операционной системы Windows 10. В среднем на обработку одного TTI моделям требуется около 1 мс; время отличается в зависимости от используемого алгоритма планирования и количества пользователей (рост линейный). Данный показатель может быть улучшен, так как в текущей версии модели нет логики параллельных вычислений и обработки с помощью графического процессора (планируется в дальнейшем), что будет полезно при выполнении симуляции с большим числом пользователей (1000+). Всего в текущей симуляции задействована одна базовая станция и три пользователя разного класса: «автомобиль», «пешеход», находящихся на разном расстоянии от базовой станции. Ресурсная сетка настроена на ширину полосы 10 МГц. Чтобы сравнить поведение исследуемых планировщиков, используются известные метрики, такие как индекс справедливости Джейна (Jain's Fairness Index), достигаемая пропускная способность, спектральная эффективность. Полный список параметров можно изучить в таблице 1.

Важно отметить, что представленный эксперимент служит демонстрацией функциональности разработанной модели и проверкой корректности ее базовых компонентов. Цель данного тестирования – демонстрация работоспособности архитектуры модели, а не получение окончательных результатов для глубокого анализа алгоритмов планирования. Параметры симуляции могут быть гибко изменены исследователем в зависимости от поставленных задач; количество пользователей, длительность симуляции, модели мобильности и канала настраиваются в широких пределах.

ТАБЛИЦА 1. Параметры симуляции

TABLE 1. Simulation Parameters

Параметр	Значение, единица измерения
Длительность симуляции	5000 мс
Ширина полосы	10 МГц
Длительность подкадра (TTI)	1 мс
Количество поднесущих на RB	12
Количество символов на RB	7
Расстояние между поднесущими	15 кГц
Размер RBG	3
Разделение каналов	FDD
Несущая частота	1800 МГц
Модель канала	UMi
Конфигурация антенны	SISO
HARQ	Отключен
Алгоритмы планирования	RR, PF, Best CQI
Мощность базовой станции	36 дБм
Количество базовых станций	1
Количество пользователей	3
Классы пользователей	Пешеход, автомобиль
Модель передвижения пользователей	Random Walk
Модель трафика	Full Buffer

3.2. Результаты симуляции

Рассмотрим подробнее метрики, на основе которых изучалась работа планировщиков. Первая метрика – пропускная способность, измеряется как общее количество бит, успешно переданных по каналу от базовой станции до пользовательского устройства в единицу времени симуляции (бит/с):

$$\text{Throughput}_n = \frac{B_n}{t_{\text{sim}}}, \quad (6)$$

$$\text{Throughput}_{\text{cell}} = \sum_{n=1}^N \text{Throughput}_n,$$

где B_n – это число переданных бит от пользовательского устройства n до базовой станции в пределах соты $cell$; t_{sim} – это время симуляции, за которое были переданы биты.

Временные диаграммы изменения пропускной способности соты для каждого планировщика отображены на рисунке 5. Для удобства, пропускная способность указана в Мбит/с. Важно отметить, что в расчете пропускной способности рассматривается полная емкость RB. Учитывается как служебная информация, передаваемая в RB, так и полезная нагрузка. Для планировщика RR в условиях симуляции пропускная способность соты остается в эталонных значениях и схожа с исследованиями, проведенными в других симуляторах [2, 14].

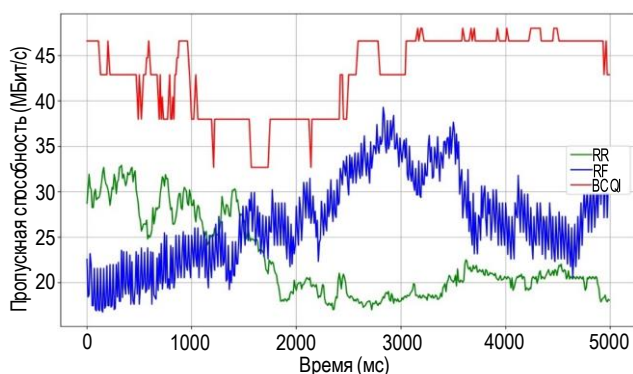


Рис. 5. График пропускной способности соты. Все планировщики

Fig. 5. Cell Throughput. All Schedulers

Для наглядности представлены графики пропускной способности каждого пользователя на протяжении всей симуляции с помощью диаграммы размаха (рисунок 6). За время симуляции передвижение абонентов было незначительным, однако, они находились на разных расстояниях от базовой станции, что повлияло на схему кодирования и модуляцию, и как следствие, на количество передаваемых бит.

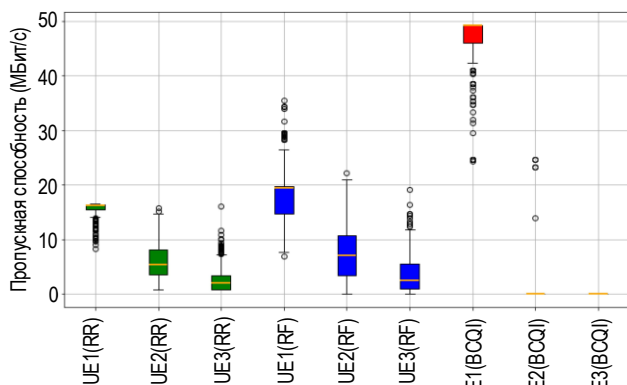


Рис. 6. Диаграмма размаха пропускной способности пользователей. Все планировщики

Fig. 6. User Throughput Boxplot. All Schedulers

Метрика Jain's Fairness Index оперирует понятием справедливости распределения общего частотно-временного ресурса между всеми пользователями и отражает то, насколько равные условия обеспечиваются для всех пользователей.

Рассчитать индекс справедливости можно по следующей формуле [16]:

$$Fairness = \frac{(\sum_{i=1}^N x_i)^2}{N \cdot \sum_{i=1}^N x_i^2}, \quad (7)$$

где N – количество пользователей в соте; x_i – достигнутая пропускная способность пользователя i , Мбит/с.

Зная пропускные способности пользователей, можно перейти к расчету индекса справедливости; результаты представлены на рисунке 7.

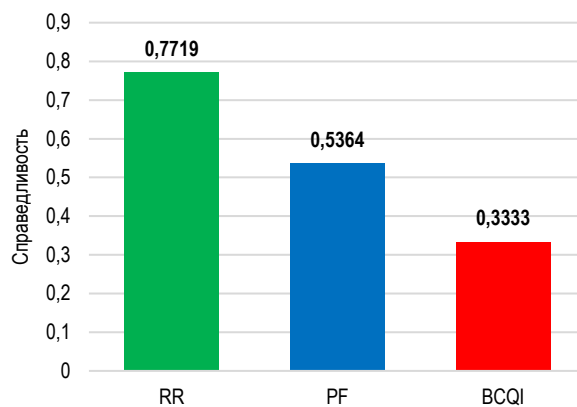


Рис. 7. Индекс справедливости для планировщиков RR, PF, Best CQI

Fig. 7. Jain's Fairness Index for RR, PF, Best CQI Schedulers

Полученные значения демонстрируют ожидаемое поведение планировщиков согласно их алгоритмической природе. Для количественного сравнения с результатами других исследований необходимо точное воспроизведение условий моделирования (количество пользователей, их расположение, модели канала), что планируется в рамках дальнейших исследований. Ключевым результатом является подтверждение качественного поведения: Best CQI показывает наименьшую справедливость, RR – наибольшую, а PF занимает промежуточное положение, что соответствует теоретическим ожиданиям.

Обращая внимание на график (см. рисунок 7), можно увидеть, что Best CQI вписывается в эталонные значения, а для PF и RR они получились ниже, чем ожидалось. Связано это, прежде всего с тем, что пользователи поставлены изначально в разные условия канала, а значит, их максимально достижимая пропускная способность ограничена модуляцией и отличается. Если указать пользователям одинаковые расстояния от базовой станции и уравнять состояния каналов, то мы обнаружим требуемые значения индекса справедливости для всех трех планировщиков.

Следующей исследуемой метрикой является спектральная эффективность, показывающая, насколько результативно используются ресурсы спектра в выделенной ширине полосы. Единицы измерения – бит/с/Гц. Это подходящая метрика для оценки планировщиков, так как эффективное использование ресурсов спектра их основная задача. Оценивать ее будем с помощью CDF – функции распределения вероятностей, по итогам получения всех значений в симуляции:

$$SE = \frac{Throughput}{W}, \quad (8)$$

$$CDF = F_{SE}(x) = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^N 1_{\{SE_i \leq x\}},$$

где Throughput – пропускная способность из (7), бит/с; W – полоса частот, Гц; K – общее число измерений; $1_{\{SE_i \leq x\}}$ – индикаторная функция CDF, равна 1, если условие выполняется, иначе – 0.

Полученные значения спектральной эффективности для каждого планировщика в единицу времени симуляции отобразим в общем графике на рисунке 8.

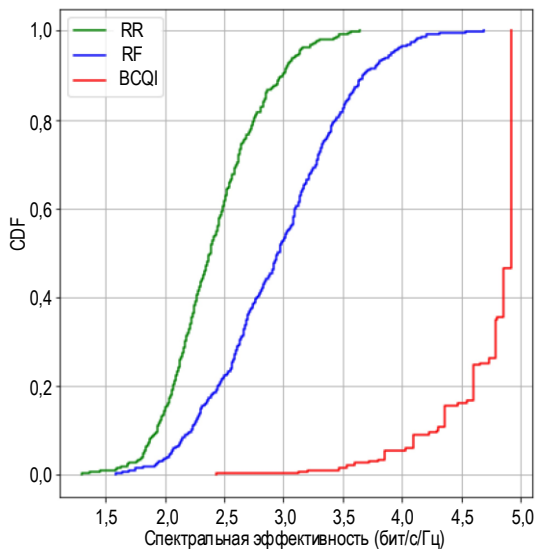


Рис. 8. Изменение спектральной эффективности соты во время симуляции при разных планировщиках

Fig. 8. Cell Spectral Efficiency Cumulative Distribution Function. All schedulers

Согласно рисунку 8, можно сделать вывод, что максимальных значений спектральной эффективности в заданных условиях симуляции можно добиться с помощью планировщика Best CQI, и это действительно так, ведь наибольшее количество ресурсов отдается пользователю с наилучшим состоянием канала, и, как следствие, наивысшей модуляцией (QAM-64). При этом сама функция демонстрирует характерную ступенчатость, с концентрацией на крайних значениях. PF планировщик дает выигрыш на фоне обычного циклического распределения RR, обеспечивая баланс между справедливостью и эффективностью, без кардинального ущерба пользователям на краю соты (график плавно возрастает). В целом, анализируя CDF, можно сделать заключение, что поведение планировщиков соответствует теоретическим ожиданиям [2].

Заключение

Универсальные симуляторы, такие как ns-3, OM-Net++, MATLAB, обладают преимуществами, которые не имеют большой значимости в исследуемой задаче. Например, ns-3 обеспечивает реалистичные модели для имитации поведения пакетных сетей передачи данных, включая поддержку Wi-Fi, WiMAX, LTE и других технологий. OMNeT++ демон-

стрирует высокую гибкость настройки и масштабируемость, что подтверждается его применением в исследованиях многополосных когнитивных радиосетей. Vienna LTE Simulator специализируется на детальном моделировании физического уровня LTE, предоставляя точные модели каналов и алгоритмов планирования.

Специализированные модели, ориентированные на конкретную предметную область, обеспечивают принципиально иной подход к решению исследовательских задач. В отличие от универсальных симуляторов, специализированная модель планирования ресурсов концентрирует вычислительные ресурсы на детальном моделировании процессов MAC-уровня, исключая накладные расходы на симуляцию протоколов. Это позволяет достичь более высокой точности моделирования критически важных процессов – распределения ресурсных блоков, адаптивной модуляции, взаимодействия планировщика с буферами пользователей.

Результаты, полученные в ходе эксперимента в рамках имитационной модели, показывают, что разработанная модель демонстрирует хорошую согласованность с теоретическими принципами и практическими результатами, описанными в исследованиях [2, 8, 14]. На примере базового сценария подтверждаются основные принципы работы классических алгоритмов планирования, действующих в сетях мобильной связи. Для RR получен корректный индекс справедливости при равномерном и неравномерном распределении пользователей по качеству каналов, продемонстрирован принцип циклического распределения ресурсов. Достижимая пропускная способность соты и спектральная эффективность для Best CQI при низкой справедливости согласуется с фундаментальными ограничениями алгоритма. PF по всем метрикам доказывает достижение компромисса, обеспечивая баланс и хорошую пропускную способность для пользователей сети.

Проведенный базовый эксперимент подтвердил корректность функционирования разработанной модели и адекватность ее поведения теоретическим принципам работы планировщиков. Модель продемонстрировала гибкость настройки параметров и готовность к проведению более масштабных исследований с увеличенным количеством пользователей, различными сценариями мобильности и детальным сравнением с результатами других симуляторов.

Модель позволяет получать обширное количество сценариев симуляции, что открывает возможности для дальнейших исследований. Реализация функционала, основанного на технических спецификациях 3GPP, обеспечивает достоверность результатов и допустимые отклонения от реалий работы сети.

На данном этапе в модели существует ряд допущений и ограничений, которые станут драйвером дальнейшего развития. В том числе реализация процесса повторной передачи HARQ, механизмов возникновения и борьбы с ошибками на уровне РНУ, организация работы с QoS-трафиком, реализация и испытание QoS-Aware-планировщиков. Интерес представляет исследование алгоритмов планирования, основанных на механизмах ML и обучения с подкреплением (DRL-планировщики), актуальность исследования которых подтверждается в [17, 18]. Также модель не ограничена в возможностях развития решения в сторону мобильных сетей связи 5G. Ведется активная работа по устранению вышеуказанных проблем. Ближайшие планы раз-

вития модели включают поэтапное внедрение интеллектуальных алгоритмов планирования ресурсов. На следующем этапе (Q3-Q4 2025) предполагается реализация DRL-планировщиков и их испытания в рамках модели согласно различным сценариям. Дополнительно проводится расширение функционала модели для поддержки различных функций, включая обработку QoS, и имитацию IoT-устройств.

Для обеспечения воспроизводимости результатов и дальнейшего развития исследований исходный код модели размещен в открытом доступе (https://github.com/sherokiddo/project_py_scheduler). Репозиторий регулярно обновляется и дорабатывается документация.

Список источников

1. Liang D., Dou X. Research on the Technology of Breaking the Shannon Channel Capacity and Shannon Limit // Research Square. 2022. DOI:10.21203/rs.3.rs-1643836/v1
2. Ashfaq K., Safdar G.A., Ur-Rehman M. Comparative analysis of scheduling algorithms for radio resource allocation in future communication networks // Peer J Computer Science. 2021. Vol. 7. P. e546. DOI:10.7717/PEERJ-CS.546. EDN:SNOOJB
3. Noman H.M.F., Hanafi E., Noordin K.A., Dimiyati K., Hindia M.N., Abdrabou A. Machine Learning Empowered Emerging Wireless Networks in 6G: Recent Advancements, Challenges and Future Trends // IEEE Access. 2023. Vol. 11. PP. 83017–83051. DOI:10.1109/access.2023.3302250. EDN:PXCKFF
4. Zaidi S.M.A., Manalastas M., Farooq H., Imran A. SyntheticNET: A 3GPP Compliant Simulator for AI Enabled 5G and beyond // IEEE Access. 2020. Vol. 8. PP. 82938–82950. DOI:10.1109/access.2020.2991959. EDN:SPFZRY
5. Manalastas M., Farooq M.U.B., Zaidi S.M.A., Qureshi H.N., Sambo Y., Imran A. From Simulators to Digital Twins for Enabling Emerging Cellular Networks: A Tutorial and Survey // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2024. Vol. 27. Iss. 4. PP. 2693–2732. DOI:10.1109/COMST.2024.3490178
6. ETSI TS 136 321 V16.6.0 (2021-10) Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Medium Access Control (MAC) protocol specification (3GPP TS 36.321 version 16.6.0 Release 16).
7. ETSI TS 136 213 V15.14.0 (2021-09) Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedures. (3GPP TS 36.213 version 15.14.0 Release 15).
8. Marinescu A., Macaluso I., DaSilva L.A. System Level Evaluation and Validation of the ns-3 LTE Module in 3GPP Reference Scenarios // Proceedings of the 13th ACM Symposium on QoS and Security for Wireless and Mobile Networks (Miami, USA, 21–25 November 2017). New York: Association for Computing Machinery, 2017. PP. 59–64. DOI:10.1145/3132114.3132117
9. Camp T., Boleng J., Davies V. A survey of mobility models for ad hoc network research // Wireless Communications and Mobile Computing. 2002. Vol. 2. Iss. 5. PP. 483–502. DOI:10.1002/wcm.72
10. Самуйлов К.Е., Гайдамака Ю.В., Шоргин С.Я. Применение моделей случайного блуждания при моделировании перемещения устройств в беспроводной сети // Информатика и ее применения. 2018. Т. 12. № 4. С. 2–8. DOI:10.14357/19922264180401. EDN:VOGJOL
11. ETSI TR 138 901 V18.0.0 (2024-05) Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz (3GPP TR 38.901 version 18.0.0 Release 18).
12. Andreev S., Anisimov A., Koucheryavy Y., Turlikov A. Practical Traffic Generation Model for Wireless Networks // In: M. Brogle, E. Osipov, T. Braun, G. Heijenk (eds.) Fourth Ercim Workshop on Emobility. 2010. PP. 61–72.
13. Marvi M., Aijaz A., Khurram M. On the Use of ON/OFF Traffic Models for Spatio-Temporal Analysis of Wireless Networks // IEEE Communications Letters. 2019. Vol. 23. Iss. 7. PP. 1219–1222. DOI:10.1109/LCOMM.2019.2917681
14. Grøndalen O., Zanella A., Mahmood K., Carpin M., Rasool J., Østerbø O.N. Scheduling Policies in Time and Frequency Domains for LTE Downlink Channel: A Performance Comparison // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2017. Vol. 66. Iss. 4. PP. 3345–3360. DOI:10.1109/TVT.2016.2589462
15. Srinivasa R.K., Kumar H. Simplified Framework for Benchmarking Standard Downlink Scheduler over Long Term Evolution // International Journal of Advanced Computer Science and Applications. 2021. Vol. 12. Iss. 5. PP. 756–763. DOI:10.14569/IJACSA.2021.0120136. EDN:MMQQBE
16. Jain R.K., Chiu D.-M., Hawe W.R. A Quantitative Measure of Fairness and Discrimination for Resource Allocation in Shared Computer Systems // ACM Transactions on Computer Systems. 1984. Vol. 2. Iss. 1. PP. 1–38.
17. Wang J., Zhuang Z., Qi Q., Li T., Liao J. Deep reinforcement learning for scheduling in cellular networks // Applied Soft Computing. 2019. Vol. 82. P. 105557. DOI:10.1016/j.asoc.2019.105557. EDN:QJAGBG
18. Брагин К.И., Тьчинкин С.А. Применение алгоритмов машинного обучения для управления ресурсами в мобильных сетях 5G // III Международная научно-практическая конференция «Инфокоммуникационные технологии: актуальные вопросы цифровой экономики» (Екатеринбург, Российская Федерация, 25–26 января 2023 г.). Екатеринбург: Уральский государственный университет путей сообщения, 2023. С. 88–91. EDN:LRXLAF

References


- Liang D., Dou X. Research on the Technology of Breaking the Shannon Channel Capacity and Shannon Limit. *Research Square*. 2022. DOI:10.21203/rs.3.rs-1643836/v1
- Ashfaq K., Safdar G.A., Ur-Rehman M. Comparative analysis of scheduling algorithms for radio resource allocation in future communication networks. *Peer J Computer Science*. 2021;7:e546. DOI:10.7717/PEERJ-CS.546. EDN:SNO0JB
- Noman H.M.F., Hanafi E., Noordin K.A., Dimyati K., Hindia M.N., Abdrabou A. Machine Learning Empowered Emerging Wireless Networks in 6G: Recent Advancements, Challenges and Future Trends. *IEEE Access*. 2023;11:83017–83051. DOI:10.1109/access.2023.3302250. EDN:PXCKFF
- Zaidi S.M.A., Manalastas M., Farooq H., Imran A. SyntheticNET: A 3GPP Compliant Simulator for AI Enabled 5G and beyond. *IEEE Access*. 2020;8:82938–82950. DOI:10.1109/access.2020.2991959. EDN:SPFZRY
- Manalastas M., Farooq M.U.B., Zaidi S.M.A., Qureshi H.N., Sambo Y., Imran A. From Simulators to Digital Twins for Enabling Emerging Cellular Networks: A Tutorial and Survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2024;27(4):2693–2732. DOI:10.1109/COMST.2024.3490178
- ETSI TS 136 321 V16.6.0 (2021-10) *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Medium Access Control (MAC) protocol specification (3GPP TS 36.321 version 16.6.0 Release 16)*.
- ETSI TS 136 213 V15.14.0 (2021-09) *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedures. (3GPP TS 36.213 version 15.14.0 Release 15)*.
- Marinescu A., Macaluso I., DaSilva L.A. System Level Evaluation and Validation of the ns-3 LTE Module in 3GPP Reference Scenarios. *Proceedings of the 13th ACM Symposium on QoS and Security for Wireless and Mobile Networks, 21–25 November 2017, Miami, USA*. New York: Association for Computing Machinery; 2017. p.59–64. DOI:10.1145/3132114.3132117
- Camp T., Boleng J., Davies V. A survey of mobility models for ad hoc network research. *Wireless Communications and Mobile Computing*. 2002;2(5):483–502. DOI:10.1002/wcm.72
- Samuilov K.Ye., Gaidamaka Yu.V., Shorgin S.Ya. Modeling movement of devices in a wireless network by random walk models // Informatics and applications. 2018;12(4):2–8. (in Russ.) DOI:10.14357/1992264180401. EDN:VOGJOL
- ETSI TR 138 901 V18.0.0 (2024-05) *Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz (3GPP TR 38.901 version 18.0.0 Release 18)*.
- Andreev S., Anisimov A., Koucheryavy Y., Turlikov A. Practical Traffic Generation Model for Wireless Networks. In: M. Brogle, E. Osipov, T. Braun, G. Heijenk (eds.) *Fourth Ercim Workshop on Emobility*. 2010. p.61–72.
- Marvi M., Aijaz A., Khurram M. On the Use of ON/OFF Traffic Models for Spatio-Temporal Analysis of Wireless Networks. *IEEE Communications Letters*. 2019;23(7):1219–1222. DOI:10.1109/LCOMM.2019.2917681
- Grøndalen O., Zanella A., Mahmood K., Carpin M., Rasool J., Østerbø O.N. Scheduling Policies in Time and Frequency Domains for LTE Downlink Channel: A Performance Comparison. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2017;66(4):3345–3360. DOI:10.1109/TVT.2016.2589462
- Srinivasa R.K., Kumar H. Simplified Framework for Benchmarking Standard Downlink Scheduler over Long Term Evolution. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*. 2021;12(5):756–763. DOI:10.14569/IJACSA.2021.0120136. EDN:MMQQBE
- Jain R.K., Chiu D.-M., Hawe W.R. A Quantitative Measure of Fairness and Discrimination for Resource Allocation in Shared Computer Systems. *ACM Transactions on Computer Systems*. 1984;2(1):1–38.
- Wang J., Zhuang Z., Qi Q., Li T., Liao J. Deep reinforcement learning for scheduling in cellular networks. *Applied Soft Computing*. 2019;82:105557. DOI:10.1016/j.asoc.2019.105557. EDN:QJAGBG
- Bragin K.I., Tychinkin S.A. Application of Machine Learning Algorithms for Resource Management in 5G Mobile Networks. *Proceedings of the IIIrd International Scientific and Practical Conference "Infocommunication Technologies: Current Issues of the Digital Economy", 25–26 January 2023, Yekaterinburg, Russian Federation*. Yekaterinburg: Ural State Transport University Publ.; 2023. p.88–91. (in Russ.) EDN:LRXLAF

Статья поступила в редакцию 08.07.2025; одобрена после рецензирования 29.09.2025; принята к публикации 01.10.2025.


The article was submitted 08.07.2025; approved after reviewing 29.09.2025; accepted for publication 01.10.2025.

Информация об авторах:


**БРАГИН
Кирилл Игоревич**

старший преподаватель кафедры телекоммуникационных систем и вычислительных средств Сибирского государственного университета телекоммуникаций и информатики
 <https://orcid.org/0000-0003-4334-0307>

**НОРИЦИН
Иван Алексеевич**

стажер отдела разработки алгоритмов уровня доступа к среде ООО «Ядро Центр Технологий Мобильной Связи»
 <https://orcid.org/0009-0000-9552-0129>

**ДРОЗДОВА
Вера Геннадьевна**

кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой телекоммуникационных систем и вычислительных средств Сибирского государственного университета телекоммуникаций и информатики
 <https://orcid.org/0009-0002-0427-9929>

Авторы сообщают об отсутствии конфликтов интересов.

The authors declare no conflicts of interests.