

Электронный научный журнал «Век качества» ISSN 2500-1841 <https://www.agequal.ru>

2025, №4 https://www.agequal.ru/pdf/2025/AGE_QUALITY_4_2025.pdf

Ссылка для цитирования этой статьи:

Каширин С.А., Тюрликов А.М., Билятдинов К.З. Теоретические основы для проектирования модели при исследовании динамического распределения коммуникационных ресурсов базовой станции сети 5G/IMT2020 // Электронный научный журнал «Век качества». 2025. №4. С. 314-328. Режим доступа: <https://www.agequal.ru/pdf/2025/425017.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

УДК 621.391

Теоретические основы для проектирования модели при исследовании динамического распределения коммуникационных ресурсов базовой станции сети 5G/IMT2020

Каширин Сергей Александрович,
аспирант,

*Государственный университет аэрокосмического приборостроения,
190000, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А*
kash_sergey@mail.ru

Тюрликов Андрей Михайлович,
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедры
«Инфокоммуникационные технологии и системы связи»,
*Государственный университет аэрокосмического приборостроений,
190000, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А*
turlikov@k36.org

Билятдинов Камиль Закирович,
доктор технических наук, доцент, профессор кафедры
«Инфокоммуникационные технологии и системы связи»,
*Государственный университет аэрокосмического приборостроения,
190000, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А*
k74b@mail.ru

В связи со стремительным ростом числа абонентских устройств, нацеленных на работу в сетях беспроводной радиосвязи 5G/IMT2020, возникла необходимость поиска алгоритмов эффективного распределения коммуникационных (частотно-временных) ресурсов базовых станций (gNB, Next Generation Node B). Для улучшения потребительского опыта создаются все

более сложные и универсальные алгоритмы. При этом нет четко описанной методики или алгоритмов, которые могли бы подойти в любой ситуации, из-за чего разработки в этом направлении продолжаются и сегодня.

В данной статье разработана математическая модель динамического распределения частотно-временных ресурсов базовой станции сети радиосвязи 5G/IMT2020, рассмотрены основные сценарии, на основе которых можно оценить работу различных алгоритмов планирования. При проектировании учтены неидеальные радиоусловия и основные технические способы увеличения пропускной способности, такие как технология MIMO, зависящая от количества приемных и передающих антенн и нумерология, которая влияет на допустимую ширину полосы частот и надежность передачи данных. В статье представлены метрики, которые позволяют полно оценить алгоритмы распределения частотно-временных ресурсов и выделить преимущества и недостатки каждого. Авторами предложены следующие пути развития математической модели для поддержки большего количества современных технологий.

Ключевые слова: 5G, теория связи, телекоммуникации, скорость передачи данных, пропускная способность.

Введение

Современные сети связи пятого поколения 5G/IMT2020 имеют три фундаментальные цели производительности [1], а именно поддержка пиковой скорости нагрузки в 20 Гбит/с, плотность подключения 1 миллиона устройств на квадратный километр, задержка радиоинтерфейса меньше 1 мс и сверхвысокая надежность в 99,999%. Не все цели можно решить с помощью одних лишь технических решений. Необходима разработка гибкого алгоритма распределения конечного числа частотно-временных радиоресурсов, позволяющий оптимально использовать данные ему ресурсы так, чтобы удовлетворять потребности всех пользователей. Существующие базовые алгоритмы планирования, такие как Proportional Fair [2, 3] или Round Robin [3] не настроены на динамическую подстройку под динамически изменяющиеся требования абонентских устройств (UE, User Equipment) к обслуживанию,

поэтому нужно провести исследование совершенно новых сценариев, отличных от тех, что были в 4G/LTE.

Разработчики ведут исследования по оптимизации алгоритмов распределения частотно-временных ресурсов для увеличения пропускной способности сети, повышения надежности и справедливости распределения между пользователями. Так, для исследования 5G существует сетевой симулятор NS-3, который, однако, неудобен в использовании и не акцентирует особое внимание на MAC уровне и, в частности, на всех тонкостях планирования радиоресурсов. Это побуждает к разработке собственной модели, которая позволит прозрачно и быстро создавать сценарии, легко имплементировать новые алгоритмы и при этом иметь гибкую архитектуру для возможности добавления новых сервисов.

Целью текущей работы является разработка математической модели процедуры распределения радиоресурсов между абонентами, учитывая все целевые требования сети радиосвязи пятого поколения 5G/IMT2020. В отличие от NS-3, планируется спроектировать более простую и гибкую систему, которая, однако, позволит в полной мере оценить все алгоритмы планирования.

Детерминированные и недетерминированные сценарии использования сети мобильными устройствами

Для исследования алгоритмов распределения частотно-временных ресурсов и разработки методологии необходимо проработать математическую модель, которая позволит в полной мере проверить все интересующие сценарии. Таким образом, первое, что необходимо предоставить – это сценарии использования сети, на основе которых можно далее спроектировать модель. Есть 3 варианта использования радиосвязи 5G/IMT2020:

- 1) массовое подключение, при котором подключается множество интернет-устройств (IoT, Internet of Things), требующих небольшое количество полосы частот;

- 2) ультравысокая надежность и ультранизкие задержки, которые, например, используются в случаях удаленного управления автомобилем;
- 3) стандартное использование полосы частот, которое присуще в 4G/LTE сети, а именно просмотр трансляций в высоком разрешении, игра в онлайн видеоигры, где присутствует определенное требование к качеству обслуживания, а также простое скачивание больших файлов.

К каждому варианту использования базовой станции радиосвязи 5G/IMT2020 можно представить детерминированные сценарии, которые позволяют оценить преимущества или недостатки предлагаемой методологии или алгоритма распределения частотно-временных ресурсов. При этом необходим один недетерминированный сценарий, который позволит оценить в долгосрочной перспективе работу алгоритма в реальных условиях, при котором будут возникать все 3 случая одновременно.

Описание сущностей модели

Теперь, определив основные сценарии, можно приступить к описанию переменных-сущностей, которые взаимодействуют друг с другом. В предлагаемой модели выделено 3 сущности: базовая станция, канал передачи данных и мобильное устройство. Упрощенное графическое представление связи этих сущностей представлено на рис. 1.

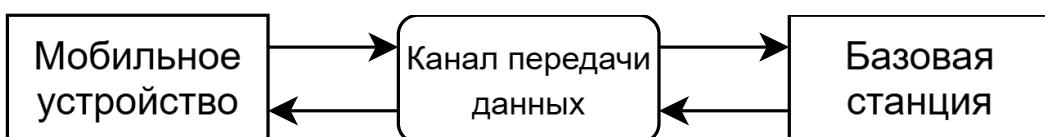


Рис. 1. Упрощенное представление связи сущностей

Мобильное устройство прежде всего передает и принимает данные, потому и параметры будут касаться именно этого:

-
- 1) количество логических каналов N_{lch} , при котором каждый логический канал характеризуется:
 - a) типом трафика T ;
 - b) частотой генерации пакетов данных F ;
 - c) размером пакета S .
 - 2) число приемных N_{rx} ;
 - 3) число передающих антенн N_{tx} ;

Настройка логических каналов с помощью изменения его параметров позволит проектировать все сценарии поведения абонентских устройств, описанные выше.

Канал передачи данных обеспечивает обмен данных между абонентских устройством и базовой станцией. Основная цель – это провести упрощенное моделирование реальных радиоусловий при передаче данных с помощью беспроводной радиосвязи. По сути, он неотъемлемая часть каждого мобильного устройства и базовой станции. Он характеризуется 2-мя параметрами:

- 1) для каждого абонентского устройства есть: своя вероятность ошибочного декодирования при приеме данных от отдельной базовой станции p_{dl} ;
- 2) для базовой станции своя вероятность ошибочного декодирования при приеме данных от отдельного мобильного устройства p_{ul} .

Базовая станция обеспечивает планирование приема и передачи данных для мобильного устройства. Она имеет следующие параметры:

- 1) количество сот N_{cell} , каждая из которых характеризуется:
 - a) шириной полосы частот B ;
 - b) шагом поднесущей Δf_{scs} ;
 - c) числом приемных N_{rx} ;
 - d) числом передающих антенн N_{tx} .

Для описания недеменированных сценариев предлагается следующий вариант описания работы мобильных устройств. Все также существует 3 типа

мобильных устройств, у каждого из которых входной поток характеризуется пуассоновским распределением $P(\lambda)$ за единицу времени в одну секунду: $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$. Ниже представлена функция вероятности распределения Пуассона:

$$p(k) \equiv P(Y = k) = \frac{\lambda^k}{k!} e^{-\lambda},$$

где k – количество событий, λ – математическое ожидание случайной величины, характеризующее среднее количество событий за фиксированный промежуток времени.

Каждый тип абонентского устройства имеет фиксированные настройки логического канала, а именно частоту генерации пакетов и размер, однако общее количество трафика, который необходим абоненту, задаётся с помощью случайной величины, которая имеет равномерное распределение $U(a,b)$. Границы у каждого типа устройства свои: $a_1, b_1, a_2, b_2, a_3, b_3$. Равномерное распределение описывается плотностью вероятности, представленной ниже:

$$f_x(x) = \begin{cases} \frac{1}{b-a}, & x \in [a,b] \\ 0, & x \notin [a,b]. \end{cases}$$

Качество радиоусловий также можно задавать с помощью случайной величины, которая будет иметь нормальное распределение $N(\mu, \sigma^2)$ с параметрами μ , равной 0.1, и дисперсией σ^2 . Плотность вероятности нормального распределения представлена ниже:

$$f_x(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}.$$

Также предлагается выделить верхнюю границу одновременно подключаемых устройств $N_{UE_{max}}$, поскольку в одной зоне соты не может существовать абсурдно большое количество устройств N_{ue} , например, 10000 на 500 метров.

Архитектура взаимодействия между мобильным устройством и базовой станцией

Абонентское устройство должно установить связь с базовой станцией. Для этого используется 2 вариации процедуры случайного доступа (Random Access RA): 4-шаговая на основе конкуренции [4] (рис. 2) и 2-шаговая без конфликтов [5] (рис. 3). Данная процедура напрямую влияет на сценарий с большим числом абонентом, поэтому она будет полностью реализована с небольшим упрощением. Во время этапа синхронизации преамбула (Msg1) и Msg2 всегда успешно доставляются вне зависимости от условий. В оставшийся этап передачи обслуживания, сообщения Msg3 и Msg4, могут быть не приняты на стороне базовой станции или абонентского устройства. В таком случае в работу вступает автоматический запрос повтора передачи HARQ ACK (Hybrid Automatic Repeat Request), которые позволяет защитить передачу сигнальных сообщений. При успешной передаче и приёме Msg3, которое является запросом на установку соединения (RRC Connection Request) на стороне базовой станции, она отвечает сообщением-разрешением на установку соединения (RRC Connection Setup). Для расчета временных интервалов, в которые отправляются все сообщения, решено придерживаться обозначений, представленных в работах [6, 7], однако с некоторыми упрощениями:

- Для Msg1: Δ_1 – время синхронизации до передачи Msg1 принимается равной 1мс; T_{RAR} – время обработки, необходимое gNB для обнаружения преамбулы (Msg1) принимается равной 0мс.
- Для Msg2: W_{RAR} – временной интервал, отведенный для ответа Msg2, принимается равным 8мс
- Для Msg3 и Msg4: $T_{M3} = \Delta_1 + T_{RAR} + W_{RAR} + \Delta_2 = 9 + \Delta_2$ – время от Msg1 до отправки Msg3, T_{HARQ} – временной интервал для приема HARQ ACK, T_{M4} – временной интервал перед передачей Msg4.

4-шаговая процедура случайного доступа на основе конкуренции

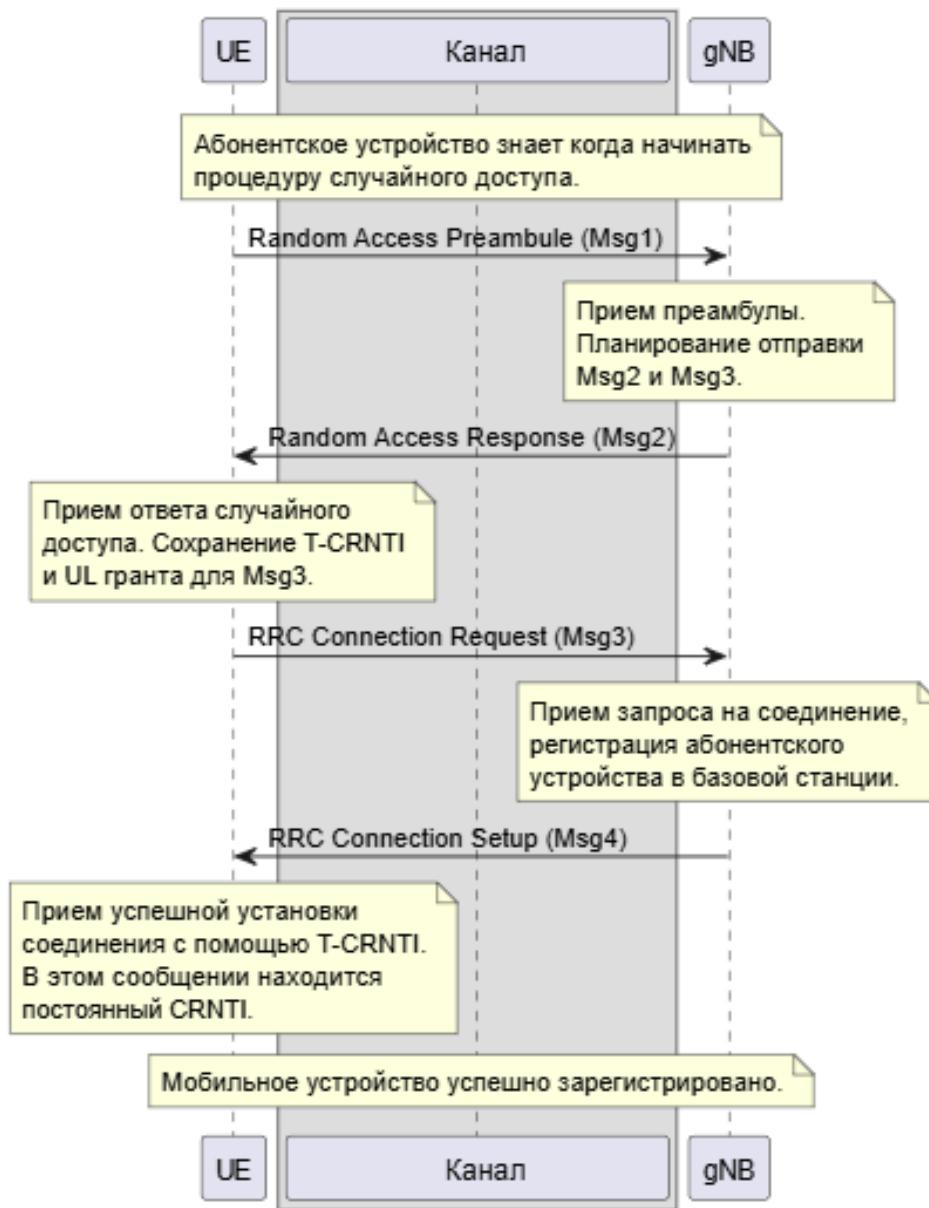


Рис. 2. 4-шаговая процедура случайного доступа

2-шаговая процедура случайного доступа фактически отличается тем, что базовая станции заранее с помощью направленной антенны отправляет преамбулу конкретному устройству, что позволяет избежать процедуры разрешения конфликта в случае, когда несколько устройств решило использовать одну и ту же преамбулу, поэтому всё заканчивается на этапе синхронизации. Временные интервалы остаются теми же.

2-шаговая процедура случайного доступа без конкуренции

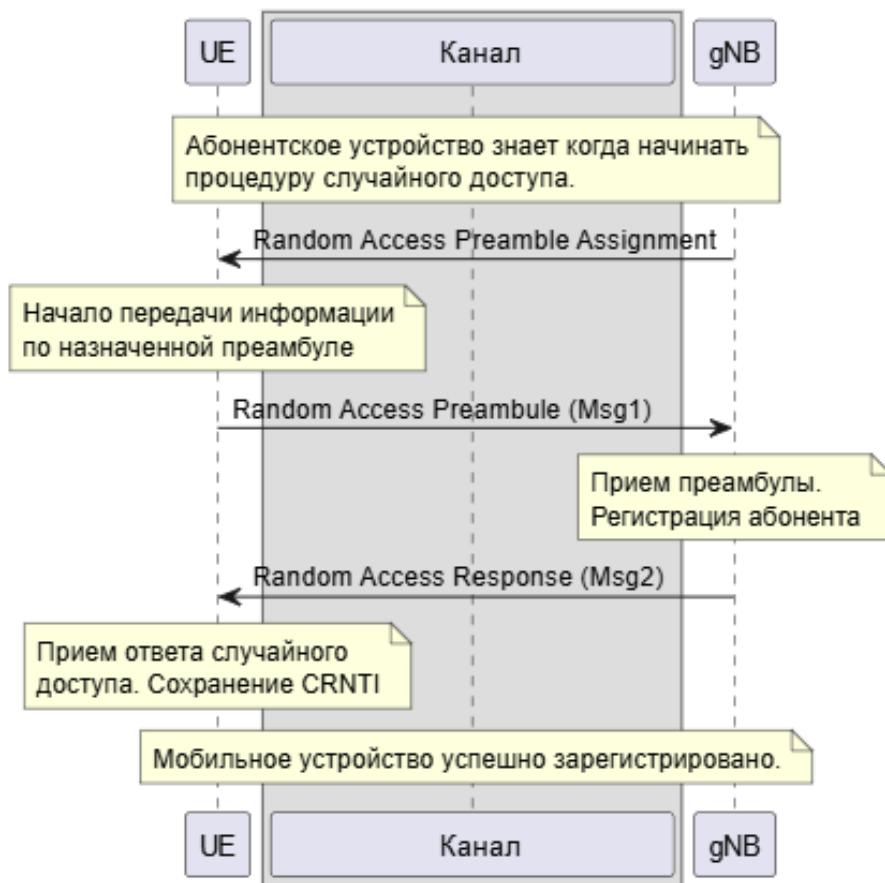


Рис. 3. 2-шаговая процедура случайного доступа

Базовой станции необходимо получать информацию о том, сколько данных присутствует для передачи от/к абонентскому устройству. Для решения этой проблемы решено передавать эту информацию через специальное сообщение с отчетом о состоянии буфера для нисходящего и восходящего канала (Message Buffer Status Report, BSR) между окончанием обработки текущего временного интервала и началом следующего. Таким образом, базовая станция всегда содержит последнюю информацию про количество требуемого трафика, что позволяет выделять требуемое количество ресурсов. Ниже представлена графическая архитектура передачи BSR от абонента к базовой станции (рис. 4).



Рис. 4. Процедура отправки отчета о состоянии буфера

Для передачи данных по нисходящему и восходящему каналу предлагается использовать 2 сообщения: о нисходящем совместном канале [8] (Message Downlink Shared Channel, DLSCH) и о восходящем совместном канале (Message Uplink Shared Channel, ULSCH). Они в себе несут информацию о количестве выделенных бит для отдельного логического канала у абонентского устройства. При этом данные считаются принятыми лишь после получения HARQ ACK, в котором подтверждается успешность приёма данных. Базовая станция планирует отправку данных и HARQ в одно и тоже время, при этом отправка данных будет осуществлена через 2 единицы времени, а HARQ через T_{HARQ} . Архитектурная схема данной процедуры отражена на рис. 5.

Приём данных в нисходящем/восходящем канале

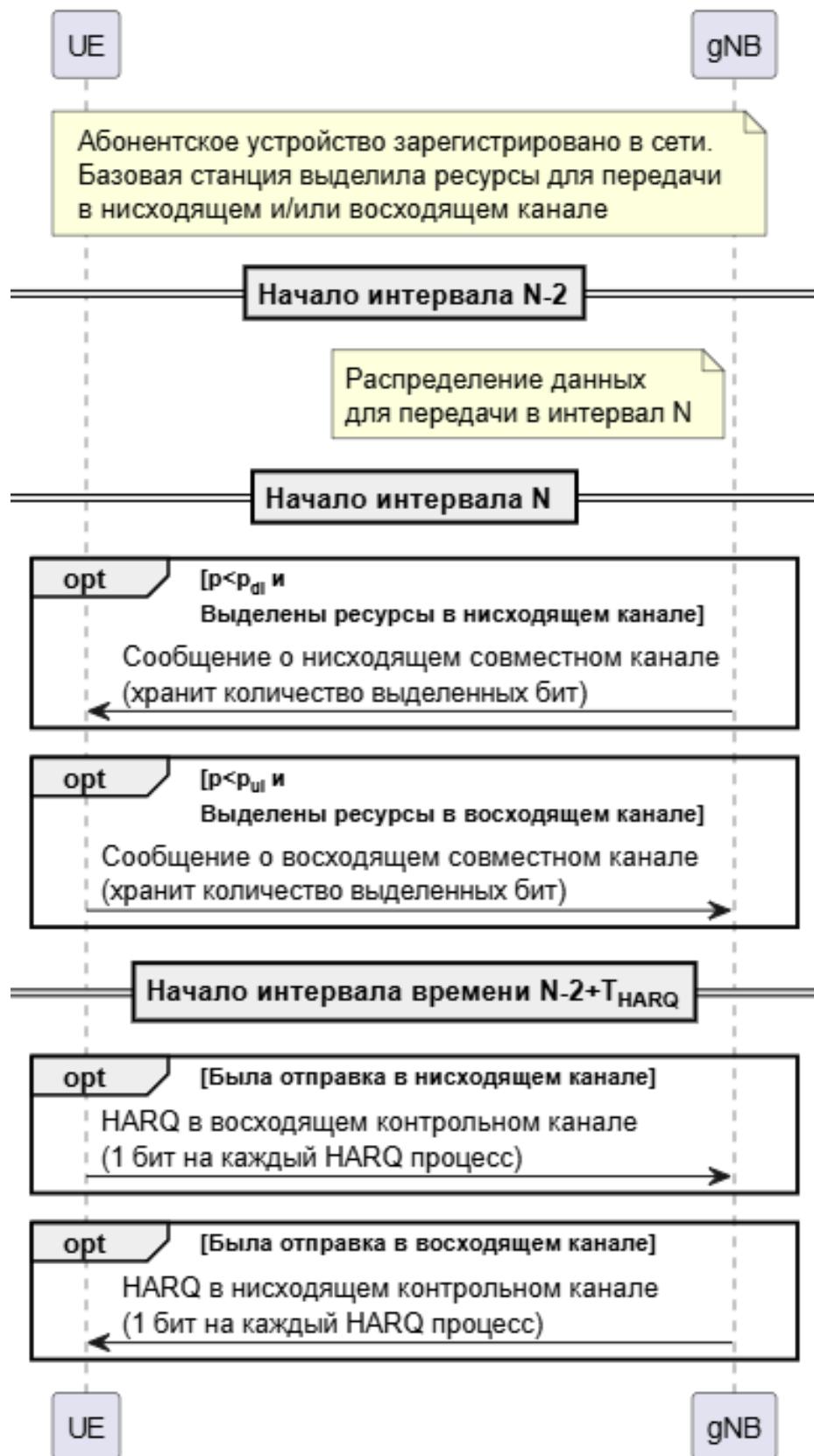


Рис. 5. Процедура отправки данных по совместному каналу

Метрики, по которым будут оцениваться алгоритмы распределения частотно-временных ресурсов, также важны, как и все вышеперечисленное ранее. Если они будут неполными, то не позволят провести качественное сравнение, что обесценивает всю разработанную модель. Основные метрики, по которым будут проводиться сравнения:

- 1) Пиковая скорость передачи данных по всем абонентам R_{max} . Данная метрика позволяет оценить полноту использования распределенных частотных ресурсов. К примеру, если абоненту требуется 100 бит, а ему выделили всю полосу частот, скорость R_{max} будет равна 100 бит/с, а не заявленной 20 Гбит/с.
- 2) Справедливость распределения радиоресурсов между абонентами. Не должно быть необслуженных пользователей или обделенных радиоресурсами. Для оценки можно использовать, к примеру, совокупность принятой информации к запрашиваемой, а также задержкам.
- 3) Задержка между передачами D. Предлагается проверять, что максимальная задержка D_{max} не превышает $D_{upper,i}$, которая обозначает максимальную допустимую задержку для i-го сценария, и сравнивать среднее значение задержки D_{avg} . Особено важно это проверять для абонентов, требующих сверхнизкую задержку, поскольку даже единовременная задержка может привести к катастрофе.
- 4) Вероятность успешных передач P_{tx} . Надежность передач данных должна всегда быть выше $P_{upper,i}$, которая обозначает максимально допустимую для i-го сценария. Это также критически важно для абонентов, требующих сверхвысокую надежность.
- 5) Оценка времени работы алгоритмы T_{algo} . Алгоритм должен быть прост и эффективен. Алгоритм должен работать за время меньшее 1мс, что накладывает серьезные ограничения на степень проработки вычислений.

Заключение

В статье представлена математическая модель, а также описаны её архитектурные особенности, которые позволяют качественно оценить работу алгоритмов планирования. Изменение параметров логических каналов позволяет в простом виде создавать свои сценарии любой сложности. Детерминированность системы упрощает исследование алгоритмов планирования, поскольку результат перестает зависеть от независящих от разработчика причин. Приближенность основных сервисов, затрагивающих MAC-уровень, к реальным позволяет полноценно оценивать алгоритмы планирования.

Видны будущие шаги для развития данной модели – это добавление агрегации несущих (CA, Carrier Aggregation), позволяющее получать данные с нескольких сот одновременно, более продвинутая работы восходящего контрольного канала (Uplink Control Channel, UCI) и нисходящего контрольного канала (Downlink Control Channel, DCI) и улучшение в работе канала, а именно использование отношения сигнала сигнал-шум и потери на пути распространения радиосигналов.

Список литературы

1. Shehab, M. J., et al. 5G networks towards smart and sustainable cities: A review of recent developments, applications and future perspectives // IEEE Access. 2022. – Vol. 10. – Pp. 2987-3006.
2. Girici, T., et al. Proportional fair scheduling algorithm in OFDMA-based wireless systems with QoS constraints // Journal of communications and networks. –2010. – Vol. 12(1). – Pp. 30-42.
3. Kawser, M. T., et al. Performance comparison between round robin and proportional fair scheduling methods for LTE. // International Journal of Information and Electronics Engineering. – 2012. – Vol. 2(5). – Pp. 678-681.

4. Семенова О.В., Власкина А.С., Медведева Е.Г., Зарипова Э.Р., Гудкова И.А. Процедура установления соединения по радиоканалу случайного доступа с возможностью ретрансляции // Discrete and Continuous Models and Applied Computational Science. – 2018. – Vol. 26(3). – Pp. 261-271.
5. Kim, J., et al. Two-step random access for 5G system: Latest trends and challenges // IEEE Network. – 2020. – Vol. 35(1). – Pp. 273-279.
6. Samouylov K.E., Gaidamaka Y.V., Gudkova I.A., Zaripova E.R., Shorin S.Y. Baseline Analytical Model for Machine-Type Communications over 3GPP RACH in LTE-Advanced Networks // Computer and Information Sciences (ISCIS 2016). – 2016. – Vol. 659. – Pp. 203-213.
7. Wei C.H., Bianchi G., Cheng R.-G. Modelling and Analysis of Random Access Channels with Bursty Arrivals in OFDMA Wireless Networks // IEEE Trans. on Wireless Communication. – 2015. – Vol. 14. – Pp. 1940-1953.
8. Туляков Ю.М., Ерютов М.В., Шахов А.Е. Анализ вариантов реализации широковещательной передачи данных (сообщений) в сотовой радиосвязи от 2G до 5G // Информационные системы и технологии ИСТ-2020: Сб-к материалов XXVI Международной научно-технической конференции. – 2020. – С. 212-219.

Theoretical foundations for model design in the study of the dynamic distribution of communication resources of the base station of the 5G/IMT2020 network

Kashirin Sergey Aleksandrovich,
*postgraduate Student, State University of Aerospace Instrumentation,
190000, Russia, St. Petersburg, Bolshaya Morskaya str., 67, lit. But*
kash_sergey@mail.ru

Turlikov Andrey Mikhailovich,
*doctor of Technical Sciences, professor, head of the department
of Infocommunication Technologies and Communication Systems,
State University of Aerospace Instrumentation,
190000, Russia, St. Petersburg, Bolshaya Morskaya str., 67, lit. But,
turlikov@k36.org*

Bilyatdinov Kamil Zakirovich,
*doctor of Technical Sciences, associate professor, professor of the department
of Infocommunication Technologies and Communication Systems,
State University of Aerospace Instrumentation,
190000, Russia, St. Petersburg, Bolshaya Morskaya str., 67, lit. But,
k74b@mail.ru*

Due to the rapid growth in the number of subscriber devices aimed at working in 5G/IMT2020 wireless radio networks, it became necessary to find algorithms for the efficient allocation of communication (time-frequency) resources of base stations (gNB, Next Generation Node B). Increasingly complex and versatile algorithms are being created to improve the consumer experience. At the same time, there is no clearly described methodology or algorithms that could be suitable in any situation, which is why development in this direction continues today.

In this article, a mathematical model of the dynamic distribution of time-frequency resources of the base station of the 5G/IMT2020 radio communication network is developed, the main scenarios are considered, on the basis of which it is possible to evaluate the operation of various planning algorithms. The design takes into account non-ideal radio conditions and the main technical ways to increase bandwidth, such as MIMO technology, which depends on the number of receiving and transmitting antennas, and numerology, which affects the allowable bandwidth and reliability of data transmission. This article presents metrics that will allow us to fully evaluate the algorithms for allocating time-frequency resources and highlight the advantages and disadvantages of each. In the end, the following ways of developing a mathematical model to support more modern technologies are proposed.

Keywords: 5G, communication theory, telecommunications, throughput, capacity.