



Теоретические вопросы информатики, прикладной математики,
компьютерных наук и когнитивно-информационных технологий

<https://doi.org/10.25559/SITITO.019.202304.805-813>

УДК 519.872

Имитационная модель обслуживания полудуплексных каналов в сети радиодоступа 5-го поколения

Е. А. Гайдамака

Оригинальная статья

ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов имени Патриса
Лумумбы», г. Москва, Российская Федерация

Адрес: 117198, Российская Федерация, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6
1032216434@pfur.ru

Аннотация

Технология интегрированного доступа и транзита (Integrated Access and Backhaul, IAB) была разработана в 2020 году для эффективного и гибкого развертывания сетей 5G NR (New Radio), призванных удовлетворить растущий спрос на качество связи, высокую скорость и минимальные задержки. Главная особенность технологии — объединение функций доступа и транзита в одной беспроводной системе. Технология стремится свести к минимуму использование волоконно-оптических соединений за счет беспроводной обратной связи. Системы IAB используют как дуплексные, так и полудуплексные соединения. Для уменьшения интерференции применяется частотное разделение дуплекса в первом случае и временное — во втором. Еще одной особенностью сетей IAB является использование ретрансляционных базовых станций, позволяющих эффективно увеличить площадь покрытия сети. Целью исследования является построение и анализ модели фрагмента сети IAB, состоящего из двух промежуточных узлов и группы абонентских устройств. Фрагмент сети представлен в виде системы массового обслуживания с двумя очередями для нисходящего и восходящего потоков данных и исчерпывающей дисциплиной обслуживания. Построена имитационная модель и приведены результаты численного эксперимента для исходных данных, близких к реальным.

Ключевые слова: 5G, технология интегрированного доступа и транзита, системы массового обслуживания, поллинг

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-79-10053 «Разработка моделей и алгоритмов обслуживания критичного к задержке и надежности доставки трафика в сценариях промышленной автоматизации на основе беспроводных систем 5G+»), <https://rscf.ru/project/22-79-10053/>.

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Гайдамака Е. А. Имитационная модель обслуживания полудуплексных каналов в сети радиодоступа 5-го поколения // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2023. Т. 19, № 4. С. 805-813. <https://doi.org/10.25559/SITITO.019.202304.805-813>

© Гайдамака Е. А., 2023



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.



**Theoretical Questions of Computer Science, Computational Mathematics,
Computer Science and Cognitive Information Technologies**

Simulation Model for a Half-Duplex Channel System in 5G Wireless Access Network

E. A. Gaidamaka

Original article

Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba,
Moscow, Russian Federation

Address: 6 Miklukho-Maklaya St., Moscow 117198, Russian Federation
1032216434@pfur.ru

Abstract

Integrated Access and Backhaul (IAB) technology was developed in 2020 to efficiently and flexibly deploy 5G NR (New Radio) networks to meet the growing demand for quality of connectivity, speed and minimal latency. The main feature of the technology is to combine access and backhaul functions in a single wireless system. The technology seeks to minimize the use of fiber optic connections through wireless backhaul. The technology may use a duplex or half duplex connection scheme. To reduce interference, frequency separation of duplex in the former case and time separation in the latter case is used. Another feature of IAB networks is the use of relay base stations, which allow effectively increasing the coverage area of the network. The aim of the study is to build and analyze a model of the IAB network fragment consisting of two intermediate nodes and a group of subscriber devices. The network fragment is represented as a queuing system with two queues for downstream and upstream data transmissions having exhaustive discipline. A simulation model is built and a preliminary numerical analysis is performed.

Keywords: 5G, Integrated Access and Backhaul, IAB, Queuing Theory, Polling

Funding: The research was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation, project No. 22-79-10053 "Development of Models and Algorithms for Supporting Delay- and Reliability-Critical Traffic Delivery in Industrial Automation Scenarios Based on 5G+ Wireless Systems", <https://rscf.ru/project/22-79-10053/>.

Conflict of interests: The author declares no conflict of interests.

For citation: Gaidamaka E.A. Simulation Model for a Half-Duplex Channel System in 5G Wireless Access Network. *Modern Information Technologies and IT-Education*. 2023;19(4):805-813. <https://doi.org/10.25559/SITITO.019.202304.805-813>



Введение

Внедрение технологии 5G NR (*New Radio*) с использованием гигагерцевого спектра открывает новые возможности для поставщиков услуг мобильной связи благодаря расширенной мобильной широкополосной связи (*Enhanced mobile broadband, eMBB*) и сверхнадежной связи с низкой задержкой (*Ultra reliable low latency communications, URLLC*). Перечисленные технологии используют высокочастотные сигналы, что ставит исследователей перед проблемой дальности распространения сигнала. Так как короткие длины волн имеют значительно меньший радиус распространения, они сильнее подвержены интерференции и затуханию. Эффективная дальность действия сигнала 5G составляет около 300 метров, поэтому при переходе к NR необходимо полностью переосмыслить архитектуру сетей 4G (где дальность сигнала достигает 16 км). Наиболее простым решением является увеличение числа антенн в зонах обслуживания, однако оно может не всегда давать желаемый результат. Технология IAB увеличивает покрытие сети за счет ретрансляции сигнала, что помогает успешно справляться с проблемой малой дальности распространения. Технология имеет большой потенциал для эффективного развертывания сетей в городских или сельских условиях. В работе проведено исследование узла IAB как поллинговой модели системы массового обслуживания (СМО), разработана имитационная модель и приведен пример численного анализа.

Технология IAB

Одним из нововведений сетей 5G является сеть радиодоступа New Radio¹. Ее ключевой особенностью является новая архитектура базовых станций. На смену eNB (*Evolved NodeB*), использующимся в сетях 4G LTE, приходят gNB (*Next Generation NodeB*) с логическим разделением на блок CU (*Central Unit*) и один или несколько блоков DU (*Distributed Unit*) [1]. Решение о разделении было принято по нескольким причинам, одной из которых является виртуализация сети. Блок CU реализует протоколы более высокого уровня и управляет блоком DU с помощью интерфейса F1. Технология IAB² [2-5] основывается на принципе разделения CU/DU, но располагает эти блоки в отдельных базовых станциях. Таким образом станция, содержащая CU, называется IAB-донор, а остальные станции – IAB-узлы. Сравнение архитектур сетей 4G LTE, 5G NR и 5G IAB представлено на рис. 1. Сеть IAB может быть представлена древовидным графом с донором в вершине, причем каждый узел содержит

блок MT (*Mobile Termination*), с помощью которого происходит соединение с родительским узлом, находящимся на шаг ближе к донору. Под блок MT может быть выделена отдельная антенна, либо он может использовать основную антенну станции – в этом случае узел будет называться виртуальным. И донор, и узлы содержат блок DU, с которым взаимодействуют UE (*User Equipment*). Обратим внимание, что интерфейс между UE и блоком DU такой же, как и между блоком MT узла и блоком DU другого узла – NR Uu (*New Radio Uu*). Это означает, что родительский узел, стоящий по цепочке ближе к донору, видит дочерний узел, стоящий ниже, как UE. При подключении UE к донору, устанавливается соединение с ядром сети и далее с основной сетью, если это требуется. При подключении UE к одному из узлов сначала устанавливается связь с донором или с узлом, находящимся на шаг ближе к донору, – и так, пока донор не будет достигнут, затем – по схеме, аналогичной описанной. Сравнение gNB и станций IAB представлено на рис. 2. Таким образом за счет разделения станций gNB на доноры и узлы сеть радиодоступа IAB значительно увеличивает покрытие, так как узлы можно расположить на некотором расстоянии друг от друга и от донора. Помимо этого такое решение уменьшает число необходимых оптоволоконных соединений, т.к. для достижения такой же величины покрытия сети NR потребовалось бы несколько станций gNB, каждая из которых была бы подключена к ядру сети проводным путем.

Еще одной особенностью IAB является эффективное использование спектра. Технология организует обратное подключение (транзит) через беспроводное соединение – так же как и доступ, поэтому важной задачей является разделение трафика транзита и доступа. IAB станции могут работать по схеме дуплекса или полудуплекса.

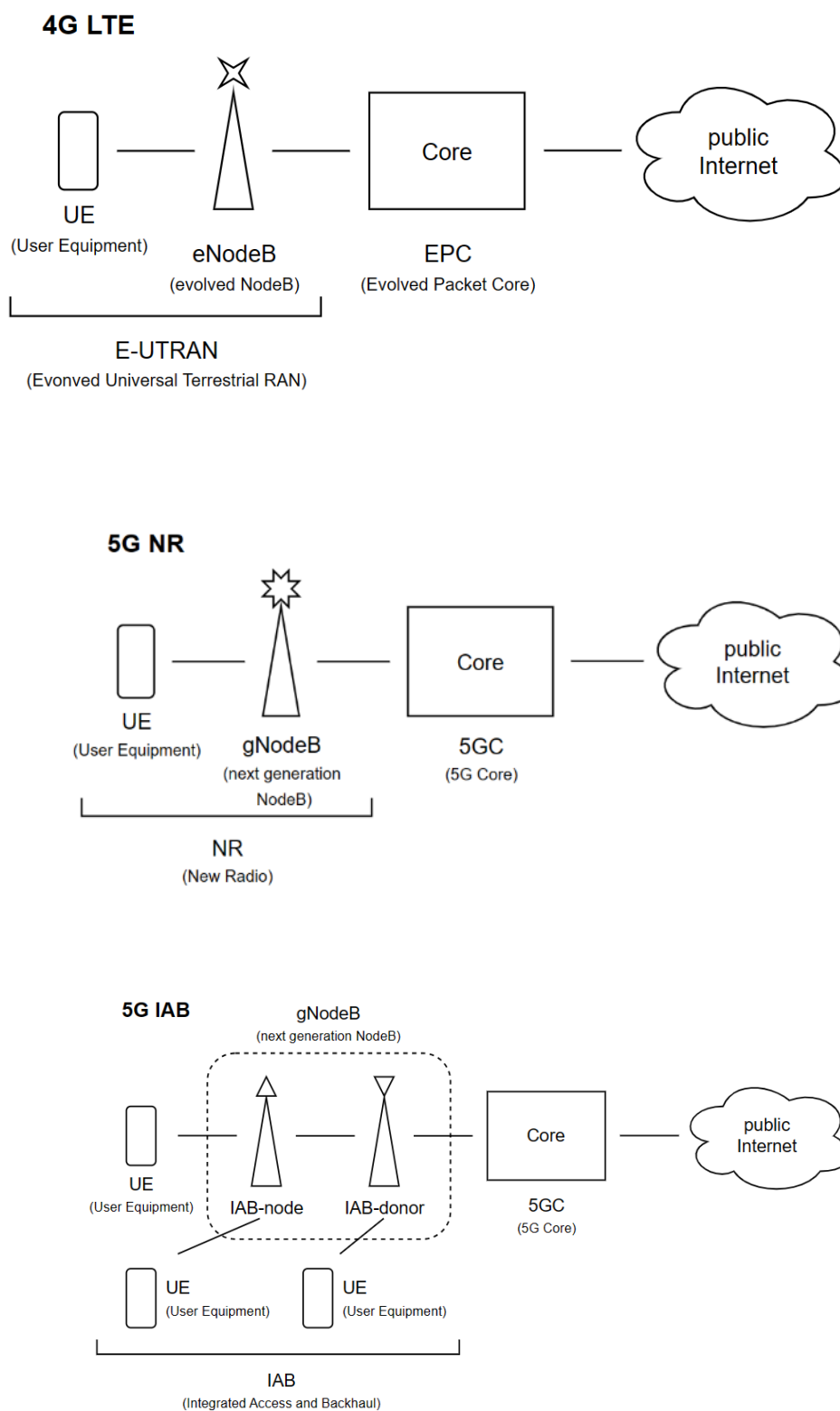
предназначенные для транзита и для доступа. Этот вариант допустим, но более эффективным считается полудуплексный. В этом случае одновременный прием и передача трафика невозможна, поэтому работу станций разделяют на временные периоды доступа и транзита. На данный момент существует ряд алгоритмов управления расписанием передачи в сети для установления эффективной работы системы³.

Сеть IAB может работать в двух режимах – SA (*Standalone*) и NSA (*Non-Standalone*). Первый вариант соответствует классической сети 5G IAB с ядром 5GC (*5G Core*) и набором станций IAB, второй вариант – интеграции 5G IAB с уже развернутыми сетями 4G LTE с ядром EPC (*Evolved Packet Core*) или 5G NR. Архитектуры перечисленных вариантов представлены на рис. 3.

¹ 3GPP TR 38.801 v14.0.0 Study on New Radio Access Technology; Radio Access Architecture and Interfaces [Электронный ресурс] // 3GPP Portal, 2023. URL: <https://www.3gpp.org/> (дата обращения: 08.10.2023).

² 3GPP. Study on Integrated Access and Backhaul : Technical Report (TR) / 3GPP. 12/2018. No. 38.874. Version 16.0.0 [Электронный ресурс] // 3GPP Portal, 2023. URL: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3665> (дата обращения: 08.10.2023); Long Haul [Электронный ресурс] // Ericsson, 2023. URL: <https://www.ericsson.com/en/portfolio/networks/ericsson-radio-system/mobile-transport/microwave/long-haul> (дата обращения: 08.10.2023).

³ Живцова А. А. Метод получения эффективного фиксированного правила управления полудуплексной сетью интегрированного доступа и транзита // Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем : материалы Всероссийской конференции с международным участием, Москва, 17-21 апреля 2023 года. М.: РУДН, 2023. С. 321-323. EDN: NQTQOI

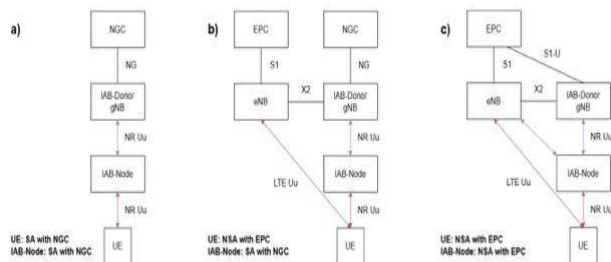


Р и с. 1. Сравнение архитектур сетей 4G LTE, 5G NR и 5G IAB
F i g. 1. Comparison of architectures of 4G LTE, 5G NR and 5G IAB networks

Источник: здесь и далее в статье все таблицы и рисунки составлены автором.
Source: Hereinafter in this article all tables and figures were made by the author.



В первом случае используется частотное разделение – выделенный под связь спектр делится на диапазоны,



Р и с. 3. Архитектуры IAB в режимах SA и NSA. NGC (Next Generation Core) означает то же, что и 5GC. NG, S2, X2, LTE Uu – интерфейсы

Fig. 3. IAB architectures in SA and NSA mode. NGC (Next Generation Core) means the same as 5GC. NG, S2, X2, LTE Uu are interfaces

За последнее время было выполнено множество исследований, посвящённых технологии IAB и её применениям. Например, в работах [6-9] исследовались задачи маршрутизации и распределения ресурсов, причем в работах [8, 9] для решения задачи оптимизации был применён метод машинного обучения, а именно обучение с подкреплением. Также проведены исследования, посвящённые выбору маршрутов [10-12], планированию сети [13-15], определению расписания передач в сети [16] и оптимизации топологии [17-19]. Сети с многоуровневой ретрансляцией активно исследуются на протяжении нескольких десятилетий [19, 20], и интерес к ним сохраняется до сих пор [21, 22].

В работе рассмотрена модель фрагмента сети IAB как системы массового обслуживания и оценено время ожидание заявок в очередях. Интерес представляет также задача минимизации сквозной задержки за счет выбора алгоритма управления расписанием передач. При больших нагрузках на систему необходимо использование механизмов ее разгрузки, чтобы избежать потери заявок [23-25].

Построение модели

Список обозначений, используемых в работе, указан в таблице 1.

Рассмотрим систему IAB, состоящую из донора, двух узлов и нескольких групп абонентских устройств (АУ) устройств, как показано на рис. 4. Назовем узел, находящийся к донору на один шаг ближе, чем другой, родительским по отношению ко второму. Назовем все узлы на один шаг дальше по цепочке – дочерними. Будем рассматривать фрагмент сети, состоящий из 3-х узлов: граничный узел, то есть не имеющий дочерних узлов, его родительский узел и подключенную к нему группу АУ. От родительского узла по направлению вниз к граничному узлу поступает поток заявок. Обозначим очередь, куда поступают заявки от родительского узла, как Q_1 . Аналогично очередь, куда поступают заявки от группы АУ – Q_2 . Схематично рассматриваемый фрагмент изображен на рис. 5.

Построим модель граничного узла в виде поллинговой

системы массового обслуживания с двумя очередями и одним обслуживающим прибором⁴. Разобьем работу прибора на фазы обслуживания и переключения⁵. Особенность рассматриваемой системы в том, что каждая очередь пополняется только во время фазы переключения прибора к ней. Таким образом дадим названия фазам: (1) пополнение очереди Q_1 , (2) обслуживание очереди Q_1 , (3) пополнение очереди Q_2 , (4) обслуживание очереди Q_2 . Диаграмма фаз работы системы представлена на рис. 6. В другой работе представлена аналогичная система, состоящая из трех фаз, в которой фазы (1) и (3) объединены.

Обозначим число заявок в очереди Q_i в момент времени $t, t \geq 0$, как $n_i(t)$. Введем $s_i(t)$ – состояние прибора, т.е. $s_i(t) = 1$, если обслуживающий прибор переключается на очередь Q_i , и $s_i(t) = 0$ – в противном случае. Модель описывается случайным процессом (СП) $X(t) = (n_1(t), n_2(t), s_1(t), s_2(t))$. Пусть $\lambda_i(s_1, s_2)$ – интенсивность пуассоновского потока 2-го рода, зависящего от состояния системы. Считаем, что $\lambda_1(1, 0) = \lambda_1$ и $\lambda_2(0, 1) = \lambda_2$, в остальных случаях $\lambda_i(s_1, s_2) = 0$. Задачу представляет разработка имитационной модели для СМО, функционирование которой описывает СП $X(t)$ на множестве состояний $X = \{(n_1, n_2, s_1, s_2): n_i \geq 0, s_i \in \{0; 1\}, i = 1, \dots, 2\}$.

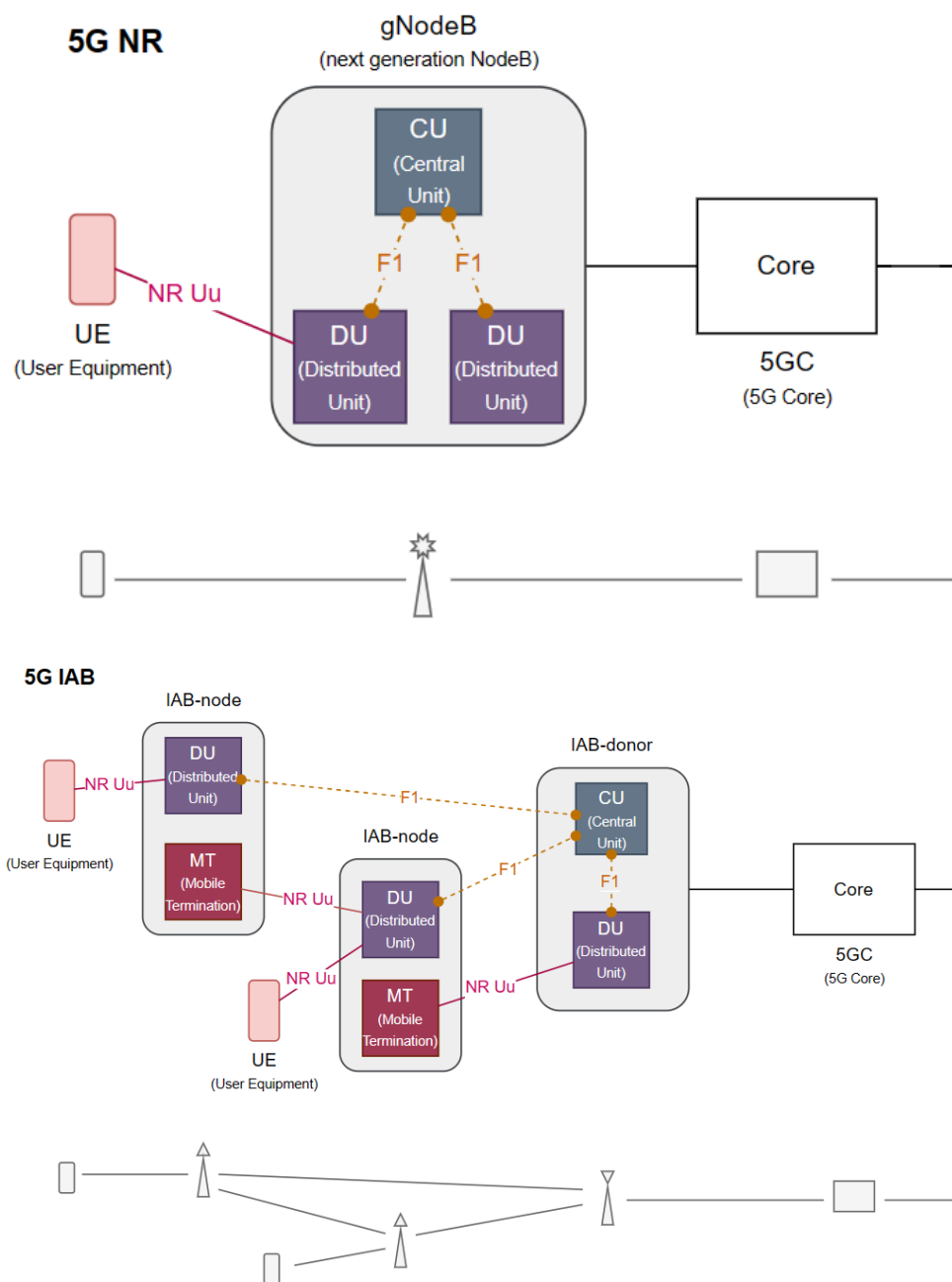
Численный анализ

Анализ характеристик системы проведен с помощью программы имитационного моделирования, написанной на языке Python. Анализ проводился в предположениях экспоненциального времени обслуживания заявок в очереди Q_i с параметром μ_i и переключения к очереди Q_i с параметром $\gamma_1 = \gamma_2 = \gamma$. Также интенсивность поступления заявок в каждую очередь считалась одинаковой – $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda$. Интенсивность поступления принята равной 10 заявок/мс. Среднее время обслуживания одной заявки в очереди Q_1 и Q_2 – 20 мс и 40 мс соответственно.

На рис. 7 показаны результаты численного анализа и зависимость среднего времени ожидания w_1 и w_2 в очередях Q_1 и Q_2 от параметра переключения между очередями γ в случаях экспоненциального и детерминированного времени переключения.

⁴ Сети 5G/6G: архитектура, технологии, методы анализа и расчета : монография / Д. А. Молчанов, В. О. Бегишев, К. Е. Самуйлов, Е. А. Кучерявый. М.: РУДН, 2022. 516 с.; Вишневский В. М., Семенова О. В. Системы поллинга: теория и применение в широкополосных беспроводных сетях. М.: Техносфера, 2007. 309 с. EDN: QMRYPZ

⁵ Применение поллинговых систем к задаче моделирования трафика интеграции доступа и транспорта / Д. И. Николаев, В. А. Бесчастный, Д. Ю. Острикова, Ю. В. Гайдамака // Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем : материалы Всероссийской конференции с международным участием, Москва, 17-21 апреля 2023 года. М.: РУДН, 2023. С. 35-40. EDN: JZBYIA

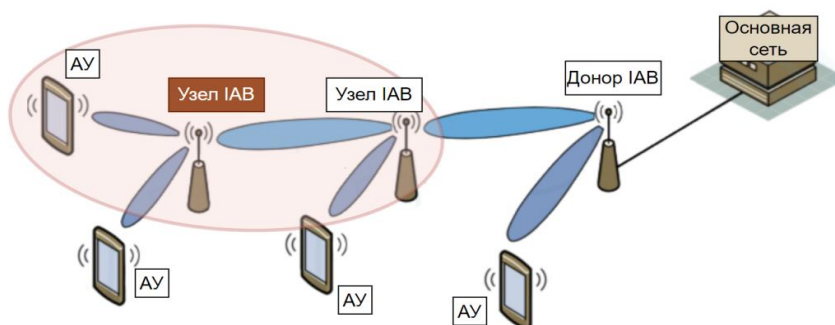


Р и с. 2. Сравнение базовой станции gNodeB с IAB-донором и IAB-узлом. Серым цветом под каждой моделью схематично изображены рассматриваемые элементы сети.

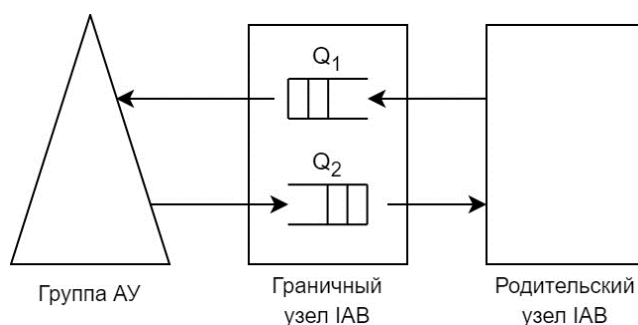
Fig. 2. Comparison of gNodeB base station with IAB-donor and IAB-node. In gray color under each model the network elements are shown schematically.

Т а б л и ц а 1. Список обозначений
Table 1. List of designations

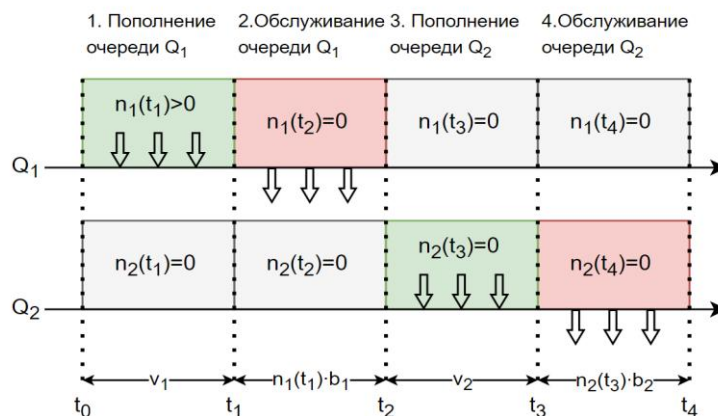
Параметр	Обозначение
Интенсивность поступления заявок в очередь Q_i	λ_i
Среднее время обслуживания заявки в очереди Q_i	b_i
Интенсивность обслуживания заявки в очереди Q_i	$\mu_i = b_i^{-1}$
Среднее время переключения прибора к очереди Q_i	v_i
Параметр переключения прибора к очереди Q_i	$\gamma_i = v_i^{-1}$
Число заявок в очереди Q_i в момент времени t	$n_i(t)$
Состояние прибора: $s_i(t) = 1$, если прибор переключается к Q_i , $s_i(t) = 0$ – в противном случае	$s_i(t)$
Случайный процесс, описывающий модель	$X(t)$



Р и с. 4. Рассматриваемая система IAB. Красным цветом выделен узел IAB, для которого будет построена модель
F i g. 4. The IAB system under consideration. The IAB node for which the model will be built is highlighted in red



Р и с. 5. Фрагмент системы IAB
F i g. 5. Fragment of the IAB system

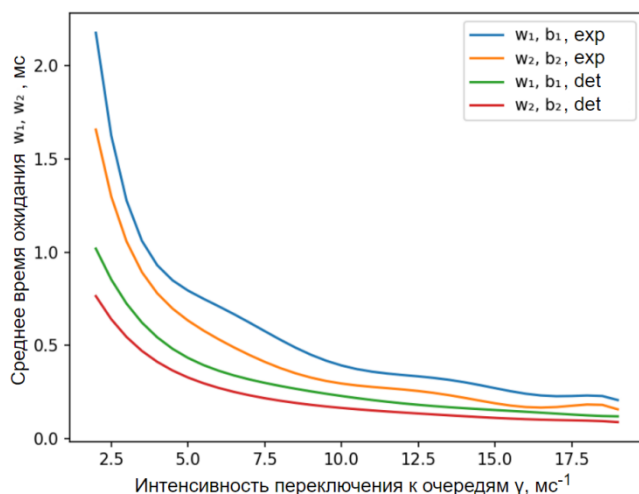


Р и с. 6. Диаграмма фаз работы системы
F i g. 6. System operation phase diagram

Численный анализ

Анализ характеристик системы проведен с помощью программы имитационного моделирования, написанной на языке Python. Анализ проводился в предположениях экспоненциального времени обслуживания заявок в очереди Q_i с параметром μ_i и переключения к очереди Q_i с параметром $\gamma_1 = \gamma_2 = \gamma$. Также интенсивность поступления заявок в каждую очередь считалась одинаковой – $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda$. Интенсивность поступления принята равной 10 заявок/мс. Среднее время обслуживания одной заявки в очереди Q_1 и Q_2 – 20 мс и 40 мс соответственно. На рис. 7 показаны результаты численного анализа и зависимость среднего времени ожидания w_1 и w_2 в

очередях Q_1 и Q_2 от параметра переключения между очередями γ в случаях экспоненциального и детерминированного времени переключения.



Р и с. 7. Влияние γ на числовые характеристики системы

Fig. 7. Influence of γ on the numerical characteristics of the system

Заключение

Технология интегрированного доступа и транзита IAB в сетях 5G представляет собой новейшее достижение в области телекоммуникаций. С ее помощью можно обеспечить более эффективное, с точки зрения покрытия обслуживаемой территории, качество связи. Задачей дальнейших является аналитическое решение задачи, а также разработка имитационной модели с исходными данными близкими к реальным.

References

1. Vörös P., Pongrácz G., Laki S. Towards a Hybrid Next Generation NodeB. In Proceedings of the 3rd P4 Workshop in Europe (EuroP4'20). New York, NY, USA: Association for Computing Machinery; 2020. p. 56-58. <https://doi.org/10.1145/3426744.3431328>
2. Dang S., Amin O., Shihada B., Alouini M.-S. What should 6G be? *Nature Electronics*. 2020;3:20-29. <https://doi.org/10.1038/s41928-019-0355-6>
3. Zhang T., Biswas S., Ratnarajah T. An Analysis on Caching in Full-Duplex Enabled mmWave IAB HetNets. In: 2019 16th International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS). Oulu, Finland: IEEE Press; 2019. p. 75-80. <https://doi.org/10.1109/ISWCS.2019.8877120>
4. Madapatha C., et al. On Integrated Access and Backhaul Networks: Current Status and Potentials. *IEEE Open Journal of the Communications Society*. 2020;1:1374-1389. <https://doi.org/10.1109/OJCOMS.2020.3022529>
5. Zhang Y., Kishk M.A., Alouini M.-S. A Survey on Integrated Access and Backhaul Networks. *Frontiers in Communications and Networks*. 2021;2:647284. <https://doi.org/10.3389/frcmn.2021.647284>
6. Huang C., Wang X., Wang X. Effective-capacity-based resource allocation for end-to-end multi-connectivity in 5G IAB networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2022;21(8):6302-6316. <https://doi.org/10.1109/TWC.2022.3148203>
7. Yin H., Roy S., Cao L. Routing and Resource Allocation for IAB Multi-Hop Network in 5G Advanced. *IEEE Transactions on Communications*. 2022;70(10):6704-6717. <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2022.3200673>
8. Zhang B., Devoti F., Filippini I. RL-based resource allocation in mmWave 5G IAB networks. In: 2020 Mediterranean Communication and Computer Networking Conference (MedComNet). Arona, Italy: IEEE Press; 2020. p. 1-8. <https://doi.org/10.1109/MedComNet49392.2020.9191546>
9. Zhang B., Devoti F., Filippini I., De Donno D. Resource allocation in mmWave 5G IAB networks: A reinforcement learning approach based on column generation. *Computer Networks*. 2021;196:108248. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2021.108248>
10. Ortiz A., Asadi A., Sim G.H., Steinmetzer D., Hollick M. SCAROS: A Scalable and Robust Self-Backhauling Solution for Highly Dynamic Millimeter-Wave Networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 2019;37(12):2685-2698. <https://doi.org/10.1109/JSAC.2019.2947925>
11. Polese M., Giordani M., Roy A., Castor D., Zorzi M. Distributed Path Selection Strategies for Integrated Access and Backhaul at mmWaves. In: 2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). Abu Dhabi, United Arab Emirates: IEEE Press; 2018. p. 1-7. <https://doi.org/10.1109/GLOCOM.2018.8647977>
12. Vu T.K., Bennis M., Debbah M., Latva-Aho M. Joint Path Selection and Rate Allocation Framework for 5G Self-Backhauled mm-wave Networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2019;18(4):2431-2445. <https://doi.org/10.1109/TWC.2019.2904275>
13. Gupta M., Rao A., Visotsky E., Ghosh A., Andrews J.G. Learning Link Schedules in Self-Backhauled Millimeter Wave Cellular Networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2020;19(12):8024-8038. <https://doi.org/10.1109/TWC.2020.3018955>
14. Gómez-Cuba F., Zorzi M. Optimal link scheduling in millimeter wave multi-hop networks with MU-MIMO radios. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2019;19(3):1839-1854. <https://doi.org/10.1109/TWC.2019.2959295>



15. Gómez-Cuba F., Zorzi M. Twice simulated annealing resource allocation for mmWave multi-hop networks with interference. In: ICC 2020-2020 IEEE International Conference on Communications (ICC). Dublin, Ireland: IEEE Press; 2020. P. 1-7. <https://doi.org/10.1109/ICC40277.2020.9149128>
16. Saha C., Dhillon H.S. Millimeter wave integrated access and backhaul in 5G: Performance analysis and design insights. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 2019;37(12):2669-2684. <https://doi.org/10.1109/JSAC.2019.2947997>
17. Madapatha C., Makki B., Muhammad A., Dahlman E., Alouini M.-S., Svensson T. On Topology Optimization and Routing in Integrated Access and Backhaul Networks: A Genetic Algorithm-Based Approach. *IEEE Open Journal of the Communications Society*. 2021;2:2273-2291. <https://doi.org/10.1109/OJCOMS.2021.3114669>
18. Islam M.N., Subramanian S., Sampath A. Integrated Access Backhaul in Millimeter Wave Networks. In: 2017 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). San Francisco, CA, USA: IEEE Press; 2017. p. 1-6. <https://doi.org/10.1109/WCNC.2017.7925837>
19. Jain K., Padhye J., Padmanabhan V.N., Qiu L. Impact of Interference on Multi-Hop Wireless Network Performance. *Wireless Networks*. 2005;11:471-487. <https://doi.org/10.1007/s11276-005-1769-9>
20. Gupta P., Kumar P.R. The capacity of wireless networks. *IEEE Transactions on information theory*. 2000;46(2):388-404. <https://doi.org/10.1109/18.825799>
21. Astudillo León J.P., de la Cruz Llopis L.J., Rico-Novella F.J. A machine learning based Distributed Congestion Control Protocol for multi-hop wireless networks. *Computer Networks*. 2023;231:109813. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2023.109813>
22. He T., Chin K.-W., Zhang Z., Liu T., Wen J. Optimizing Information Freshness in RF-Powered Multi-Hop Wireless Networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2022;21(9):7135-7147. <https://doi.org/10.1109/TWC.2022.3155168>
23. Kanzitdinov S.K., Bouatta M.A., Vasilyev S.A., Tsareva G.O. Numerical Analysis of the Control Problem for a Queuing System with a Small Parameter on a Non-Uniform Grid Scheme. *Modern Information Technologies and IT-Education*. 2023;19(3):543-553. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.25559/SITI-TO.019.202303.543-553>
24. Bouatta M.A., Vasilyev S.A., Kanzitdinov S.K., Tsareva G.O. Numerical Analysis of the Shortest Queue Problem for a Time-Scalable Queuing System with a Small Parameter on a Non-Uniform Grid Scheme. *Modern Information Technologies and IT-Education*. 2022;18(3):496-506. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.25559/SITITO.18.202203.496-506>
25. Vasilyev S.A., Bouatta M.A., Kanzitdinov S.K., Tsareva G.O. The Numerical Analysis of the Time-Scale Shortest Queue Model Under the Dobrushin Mean-Field Approach. In: Dudin A., Nazarov A., Moiseev A. (eds.) *Information Technologies and Mathematical Modelling. Queueing Theory and Applications. ITMM WRQ 2023 2023. Communications in Computer and Information Science*. Vol. 2163. Cham: Springer; 2024. p. 188-201. https://doi.org/10.1007/978-3-031-65385-8_14

Поступила 08.10.2023; одобрена после
рецензирования 04.11.2023; принята к публикации
28.11.2023.

Submitted 08.10.2023; approved after reviewing
04.11.2023; accepted for publication 28.11.2023.

Об авторе:

Гайдамака Елизавета Александровна, студент кафедры теории вероятностей и кибербезопасности Института компьютерных наук и телекоммуникаций, ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы» (117198, Российская Федерация, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-8767-028X>, 1032216434@pfur.ru

About the author:

Elisaveta A. Gaidamaka, Student of the Probability Theory and Cybersecurity Department, Applied Mathematics & Communications Technology Institute, Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba (6 Miklukho-Maklaya St., Moscow 117198, Russian Federation), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-8767-028X>, 1032216434@pfur.ru

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

The author has read and approved the final manuscript.