

УДК 519.245

DOI: 10.25559/SITITO.15.201902.263-273

Модель обслуживания трафика одноадресных и многоадресных соединений высокочастотной сети 5G

В. А. Бесчастный^{1*}, Ю. В. Гайдамака^{1,2}

¹ Российский университет дружбы народов, г. Москва, Россия

117198, Россия, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6

*beschastnyu-va@rudn.ru

² Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии

наук, г. Москва, Россия

119333, Россия, г. Москва, ул. Вавилова, д. 44-2

Аннотация

Многоадресные соединения широко применяются в традиционных проводных и беспроводных сетях, поскольку они позволяют значительно улучшить спектральную эффективность при наличии пользователей, заинтересованных в одном и том же контенте. Тем не менее, поддержке такого типа услуг в будущих системах 5G New Radio (NR) до сих пор уделялось внимание лишь в небольшой степени. Передача данных в таких системах будет вестись в миллиметровом диапазоне длин волн, особенностью которого является необходимость прямой видимости между устройствами, участвующими в соединении. Одной из задач в сетях, построенных на основе миллиметровых точек доступа, является задача нахождения оптимального расположения точек доступа для обеспечения зоны покрытия сети устойчивой связью. В этой статье, применяя методы как теории массового обслуживания, так и стохастической геометрии, разрабатывается модель базовой станции 5G NR (BS), одновременно обслуживающей трафик одноадресных и многоадресных соединений. Для построенной модели с помощью имитационного моделирования проводится анализ таких показателей эффективности, как вероятность сброса одноадресных и многоадресных сессий, а также коэффициент использования системных ресурсов. Результаты численных экспериментов показывают, что наличие многоадресного трафика серьезно снижает производительность обслуживания одноадресных сессий. Кроме того, этот эффект усиливается при увеличении расстояния между соседними базовыми станциями. На основании этого, можно сделать вывод о том, что для обеспечения гарантированных показателей обслуживания в подобных системах необходим явный механизм резервирования ресурсов NR BS.

Ключевые слова: миллиметровый диапазон, одноадресные соединения, многоадресные соединения, ресурсная СМО, имитационное моделирование.

Финансирование: данная работа была подготовлена при поддержке Программы повышения конкурентоспособности РУДН «5-100» и частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научных проектов № 17-07-00845 «Разработка информационной технологии для анализа и расчета вероятностно-временных характеристик взаимодействия движущихся устройств в беспроводных сетях Интернета вещей» и № 18-07-00156 «Разработка вероятностно-статистических методов анализа устойчивости высокопроизводительных вычислительных систем и мультисервисных сетей последующих поколений с взаимодействующими компонентами».

Для цитирования: Бесчастный В. А., Гайдамака Ю. В. Модель обслуживания трафика одноадресных и многоадресных соединений высокочастотной сети 5G // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2019. Т. 15, № 2. С. 263-273. DOI: 10.25559/SITITO.15.201902.263-273

© Бесчастный В. А., Гайдамака Ю. В., 2019



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



Modeling Mixture of Unicast and Multicast Communications in 5G High Frequency Networks

V. A. Beschastnyi^{a*}, Yu. V. Gaidamaka^{a,b}

^a Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, Russia

6 Miklukho-Maklaya St., Moscow 117198, Russia

* beschastnyy-va@rudn.ru

^b Federal Research Center "Computer Science and Control" of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

44-2 Vavilov St., Moscow 119333, Russia

Abstract

Multicasting is widely used in conventional wired and wireless networks as it allows significantly improving resource utilization in presence of users interested in the same content. However, the support of this type of service in prospective 5G New Radio (NR) systems has received only little attention so far. NR systems operating in millimeter wave (mmWave) frequency, a feature of which is the need for direct visibility between devices involved in the connection. One of the tasks in NR systems is the problem of finding the optimal location of access points to provide a network with a stable connection. In this paper, merging the tools of queuing theory and stochastic geometry we develop a model of 5G NR base station (BS) serving a mixture of unicast and multicast traffic. We validate our model against computer simulations using multicast/unicast session drop probabilities and system resource utilization as metrics of interest. Our numerical results illustrate that the presence of multicast type of traffic severely compromises performance of unicast sessions. Furthermore, this effect is amplified when the inter-site distance (ISD) between BSs increases. Thus, to satisfy prescribed performance guarantees in terms of unicast and multicast session drop probabilities, explicit resource reservation mechanism at NR BS might be required.

Keywords: New Radio, unicast, multicast, resource queue, simulation.

Funding: This work was prepared with the support of the RUDN 5-100 Competitiveness Enhancement Program and partial financial support of the Russian Foundation for Basic Research as part of research projects No. 17-07-00845 "Development of Information Technology for Analysis and Calculation of the Probability-Time Characteristics of the Interaction of Moving Devices in Wireless Networks of the Internet of Things" and No. 18-07-00156 "Development of Probabilistic-Statistical Methods for Stability Analysis of High-Performance Computing Systems and Next-Generation Multiservice Networks with Interacting.

For citation: Beschastnyi V.A., Gaidamaka Yu.V. Modeling Mixture of Unicast and Multicast Communications in 5G High Frequency Networks. *Sovremennye informacionnye tehnologii i IT-obrazovanie* = Modern Information Technologies and IT-Education. 2019; 15(2):263-273. DOI: 10.25559/SITI-TO.15.201902.263-273



Введение

Новая технология радиодоступа 3GPP New Radio (NR), которая в настоящее время стандартизируется консорциумом 3GPP (англ. 3rd Generation Partnership Project)¹, станет ключевой технологией в системах мобильной связи пятого поколения. Системы NR, работающие в полосе частот миллиметрового диапазона, позволяют достигать высоких скоростей передачи данных в несколько гигабит, а также гораздо меньших задержек на уровне радиоканала по сравнению с системами LTE (англ. Long Term Evolution)². Поскольку поставщики телекоммуникационных услуг и операторы сетей уже проводят первые полевые испытания этой новой технологии³, перед исследователями сообществом возникает ряд новых задач, заключающихся в анализе производительности, применимости и возможности внедрения новых услуг в системах 5G NR [1, 2]. Помимо новых уникальных возможностей, системы 5G NR ставят перед проектировщиками множество неразрешенных задач, среди которых гораздо более высокие потери качества при распространении сигнала по сравнению с микроволновой связью, блокировка распространения радиолучей небольшими динамическими объектами, необходимость в эффективных механизмах управления лучом и т.д. [3]. В реальных условиях на открытом пространстве системы 5G NR в основном страдают от подвижных препятствий, таких как люди и автомобили, являющихся блокираторами радиосигнала [4].

В зависимости от среды распространения сигнала и расстояния до базовой станции NR BS (англ. New Radio Base Station) пользовательское оборудование (англ. User Equipment, UE), временно попавшее в состояние блокировки радиосигнала блокиратором, может либо выйти из зоны обслуживания базовой станции, либо понизить свою схему модуляции и кодирования таким образом, чтобы вероятность ошибки на уровне канала была сведена до целевого значения⁴. Для решения проблемы выхода из зоны обслуживания 3GPP недавно предложили механизм «множественных соединений» (англ. multiconnectivity), при котором одновременно поддерживается несколько активных каналов связи устройства с резервными соседними NR BS, и соединение передается между ними в случае возникновения блокировки⁵. В условиях блокировки для поддержания требуемой скорости как через основную, так и через резервную BS, требуется больше физических ресурсов. Если радио ресурсов недостаточно, чтобы поддерживать требуемую скорость, либо прекращается текущая сессия, либо услуга предоставляется пользователю на более низкой скорости соединения, если это допускается соглашением об уровне обслуживания (Service Level Agreement, SLA) [1, 5]. Производительность системы при обслуживании одноадресного типа трафика к настоящему моменту была неоднократно

исследована с использованием методов стохастической геометрии и теории массового обслуживания, например, [2, 6]. Однако, поддержка многоадресных соединений в этих системах до сих пор рассматривалась лишь косвенно. В частности, авторы в [7-9, 10] предлагают алгоритмы оптимизации для поддержки многоадресной передачи в системах NR, предполагая, что NR BS обслуживает только многоадресный трафик. В единственной известной авторам работе [11], в которой рассматривается одновременное обслуживание одноадресного и многоадресного трафика, предлагается достаточно простая аналитическая модель для обслуживания трафика комбинации одноадресных и многоадресных соединений и сделано заключение о возможности достичь баланса между показателями производительности для одноадресных и многоадресных сессий и количеством элементов антенны, используемых в NR BS. В частности, чтобы оптимизировать процесс обслуживания многоадресных соединений, зона покрытия одним элементом антенны должна быть максимально расширена, что в свою очередь сокращает общую зону покрытия одной NR BS.

Данная работа является продолжением исследований, представленных в [11], и в ней рассматривается функционирование базовой станции, обслуживающей комбинацию одноадресных и многоадресных сессий. Сначала с помощью методов стохастической геометрии и модели распространения сигнала 3GPP определяется количество радио ресурсов, требуемых UE. Затем проводится построение модели массового обслуживания со случайными требованиями к ресурсам, потоком событий блокировки прямой видимости (англ. Line-of-Sight, LoS) и двумя типами трафика с различными стратегиями распределения ресурсов, предназначенных для анализа трафика одноадресных и многоадресных соединений. В работе исследуются показатели эффективности, представляющие интерес как для конечных пользователей, так и для всей системы в целом, включая вероятности сброса одноадресных и многоадресных сессий, а также использование системных ресурсов. Отличительными особенностями проводимых исследований являются наличие многоадресного типа трафика, который значительно снижает производительность одноадресной передачи с точки зрения вероятности сброса сессии, а также анализ отрицательного влияния многоадресного трафика с увеличением расстояния между узлами сети (англ. Inter Site Distance, ISD).

Предположения для построения модели соты сети 5G NR

Мы рассматриваем работу базовой станции 5G NR (BS), одновременно обслуживающей сессии одноадресного и многоадресного типов – целевая BS на рис. 1. В момент возникнове-

¹ IEEE Standard for Information technology – Telecommunications and information exchange between systems – Local and metropolitan area networks – Specific requirements – Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 3: Enhancements for Very High Throughput in the 60 GHz Band. IEEE Std 802.11ad-2012 (Amendment to IEEE Std 802.11-2012, as amended by IEEE Std 802.11ae-2012 and IEEE Std 802.11aa-2012), 28 Dec. 2012, pp.1-628. DOI: 10.1109/IEEESTD.2012.6392842

² Там же.

³ mmWave 5G NR prototype demo video // Qualcomm [Электронный ресурс]. URL: <https://www.qualcomm.com/videos/mmwave-5g-nr-prototype-demo-video> (дата обращения: 16.05.2019).

⁴ 3GPP NR: Physical channels and modulation (Release 15), 3GPP TR 38.211. December 2017. [Электронный ресурс]. URL: https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/38_series/38.211/ (дата обращения: 16.05.2019).

⁵ 3GPP NR: Multi-connectivity; Overall description (Release 15). 3GPP TS 37.340 V15.2.0. June 2018. [Электронный ресурс]. URL: https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/37_series/37.340/ (дата обращения: 16.05.2019).

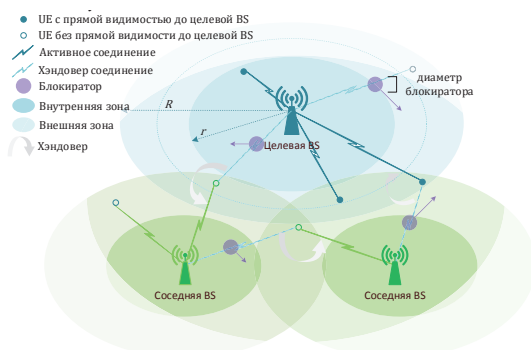


ния запроса на предоставление услуги основной для пользователя является BS, которая обеспечивает наиболее высокое качество в радиоканале в условиях прямой видимости LoS. Как правило, это ближайшая к точке местоположения UE пользователя BS. При этом в случае появления блокиратора прямой видимости nLoS происходит попытка хэндовера: соединение может быть передано на соседнюю BS – ту из резервных BS, которая обеспечивает лучшее качество в радиоканале и имеет свободный ресурс для поддержания соединения. Каждая BS имеет зону покрытия в виде круга радиуса R , который рассчитывается из модели распространения волн миллиметровой длины и набора схем модуляции и кодирования MCS (англ. Modulation and Coding Scheme)⁶. Предполагается, что пользователи случайно распределены по зоне покрытия в соответствии с пуассоновским точечным процессом с параметром ρ . Таким образом, поступление на BS пользовательских запросов на установление соединений является пуассоновским процессом с параметрами $\Lambda^{r,i} = \lambda^{r,i} \rho^i \pi r^2$, $\Lambda^{R,i} = \lambda^{R,i} \rho^i \pi (H^2 - r^2)$ и $\Lambda^{H,i} = \lambda^{H,i} \rho^i \pi (R^2 - H^2)$, где λ^i – параметр экспоненциально распределенных интервалов между двумя последовательными поступлениями запросов от одного пользователя, а ρ^i представляет плотность размещения пользователей. Здесь индекс $i \in \{U, M\}$ определяет тип трафика – одноадресный и многоадресный, соответственно.

Для обслуживания пользовательского запроса BS выделяет радиочастотный ресурс, размер которого в общем случае является случайной величиной и определяется местоположением UE. Согласно⁷, затухание радиосигнала в пространстве L_{dB} определяется следующими уравнениями:

$$L_{dB}(x) = \begin{cases} 32,4 + 21 \log(x) + 20 \log f_c, & \text{при прямой видимости} \\ 47,4 + 21 \log(x) + 20 \log f_c, & \text{без прямой видимости} \end{cases}$$

где f_A – рабочая частота, измеряемая в ГГц, x – расстояние между BS и UE. Из этих уравнений нетрудно найти максимальные расстояния d_{LoS}^E и d_{nLoS}^E , при которых UE может установить соединение в состояниях прямой видимости (LoS) и состоянии без прямой видимости (nLoS) соответственно, задав пороговое значение L_{dB} как минимальное допустимое значение соотношений сигнал-шум (англ. Signal-to-Noise Ratio, SNR), при котором соединение может быть установлено.



Р и с. 1. Модель установления соединений
F i g. 1. Connection Model

Предложенная модель учитывает возможность появления блокираторов на линии прямой видимости для пользователей по всей зоне покрытия [12]. При появлении блокиратора между UE и BS на расстоянии менее чем d_{LoS}^E сессия может по-прежнему поддерживаться через основную BS путем выделения на ней большего количества ресурсов для компенсации сниженного качества канала. Это допускается лишь при небольшом удалении UE от BS и определяет радиус $r = d_{LoS}^E$ так называемой «внутренней зоны», имеющей форму круга. «Внешняя зона» имеет форму кольца, радиус R который определяется аналогично как расстояние от BS до границы зоны покрытия, и напрямую связан с понятием множественных соединений: UE из внешней зоны не может поддерживать соединение с основной BS без прямой видимости, но при этом сессия может быть передана на обслуживание соседней BS, до которой есть прямая видимость. Очевидно, что радиус внешней зоны находится в пределах $r \ll R \ll d_{nLoS}^E$ и определяет ISD (англ. inter-site distance) – максимальное расстояние между BS для обеспечения полного покрытия обслуживаемой территории, т. о. $d_{ISD} = R + r$. Если расстояние между UE и BS больше, чем R , пользователь выходит из зоны обслуживания, и обслуживание его сессии не может быть продолжено. В этих случаях говорят о сбросе сессии.

На рис. 2 изображен процесс выделения целевой базовой станцией ресурса W , который разбивается на C ресурсных блоков и может заниматься одноадресными и многоадресными сессиями. Во внешней зоне, когда прямая видимость для UE заблокирована, сессия передается соседней BS, при этом на соседней BS потребуется большее количество ресурсов, чем было ранее выделено на основной BS. Поскольку UE всегда обслуживается в BS с лучшим качеством сигнала, при восстановлении прямой видимости к основной BS, обслуживание сессии возвращается на нее с прежним требованием к ресурсу. Однако в этот момент может оказаться, что у основной BS уже нет достаточного количества свободных ресурсов для продолжения обслуживания сессии, в этом случае сессия продолжает свое обслуживание на соседней BS до тех пор, пока не освободится необходимое количество ресурсов на основной BS. Аналогичным образом, изначально установленные в зоне соседней BS сессии, для которых она является основной, при появлении блокиратора могут быть переданы целевой BS, где они так же потребуют большего ресурса, чем те, для которых основной сессии получает отказ (сброс сессии), если количество доступного ресурса недостаточно для поддержания новой сессии. Одним из наиболее интересных показателей эффективности является вероятность прерывания обслуживания сессии, возникающего в ситуации, когда при возникновении блокировки прямой видимости требуемый дополнительный ресурс недоступен. Применительно к многоадресным соединениям под сессией понимаем обслуживание всех UE, запрашивающих одну и ту же услугу и получающих обслуживание на одном и том же ресурсе, выделенном для обслуживания в момент приема в систему первого запроса на предоставление этой услуги, поступившего при отсутствии подобных запросов в системе

⁶ 3GPP. NR: Physical channels and modulation (Release 15), 3GPP TR 38.211. December 2017. [Электронный ресурс]. URL: https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/38_series/38.211/ (дата обращения: 16.05.2019).

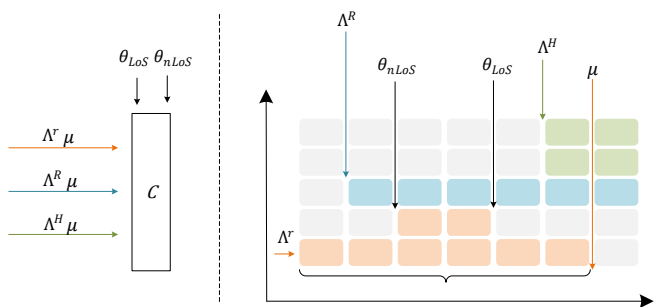
⁷ 3GPP. 5G; Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz (Release 14). 3GPP TR 38.901. May 2017. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.3gpp.org/DynaReport/38901.htm> (дата обращения: 16.05.2019).



[13]. Отказ на запрос в установлении многоадресной сессии во внутренней зоне происходит, только если в момент поступления запроса нет многоадресных сессий с таким же или большим требованием, и количество доступного ресурса недостаточно для инициализации новой сессии. Когда на линии прямой видимости появляется блокиратор, сессия UE, находящегося во внешней зоне, передаётся на соседнюю BS, ресурс которой предполагается бесконечным, что означает, что хэндовер в этом случае всегда возможен. Как только блокиратор уходит с линии прямой видимости, сессия продолжает обслуживаться соседней BS до того момента, пока на исходной BS не освободится доступный ресурс, достаточный для поддержания сессии, после чего сессия мгновенно передается обратно. Для описанных случаев отказа в обслуживании в статье используется термин «сброс», в то время как термин «блокировка» относится к случаям появления блокиратора на линии прямой видимости. В следующем разделе описано построение ресурсной системы массового обслуживания (СМО) [14] с тремя входящими потоками заявок, дискретным ресурсом конечного объема и заявками со случайными дискретными требованиями к ресурсу. Для краткости далее вместо «запрос на установление сессии» будет использоваться термин «запрос».

Построение математической модели отдельно стоящей соты сети 5G NR

Для описания процесса обслуживания запросов пользователей отдельно стоящей базовой станцией (целевой BS на рис. 1) рассмотрим ресурсную СМО с неограниченным числом приборов и дискретным ресурсом конечного объема единиц ресурса [13, 15-17]. На систему поступают три потока заявок, соответствующие потокам запросов пользователей на установление одноадресных и многоадресных сессий в внутренней (круг) и внешней (кольцо) зонах покрытия целевой BS, а также на обслуживание сессий, заблокированных в соседней BS.



Р и с. 2. Схема СМО и распределения ресурса

Fig. 2. Scheme of a queuing system and resource distribution of a queuing system

Предположим, все потоки – пуассоновские с параметрами $\Lambda^r = \lambda^{r,U} + \lambda^{r,M}$, $\Lambda^R = \lambda^{R,U} + \lambda^{R,M}$ и $\Lambda^H = \lambda^{H,U} + \lambda^{H,M}$ соответственно, где U и M указывают на тип сессии, а r , R и H – на зону обслуживания (внутренняя зона, внешняя зона, зона обслуживания соседней BS), которая определяется местоположением устройства и состоянием радиоканала до базовых станций. Длительности обслуживания заявок, для которых целевая BS является основной, подчиняются экспоненциальному закону с параметрами φ^U и φ^M соответственно типу заявки и не зави-

сят от местоположения соответствующего устройства. Длительность пребывания в системе заявок, заблокированных на соседней BS и временно обслуживаемых целевой BS, также имеет экспоненциальное распределение с параметром φ_{nLoS} . В таблице 1 представлены основные обозначения, используемые в работе.

Т а б л и ц а 1. Основные обозначения
Table 1. Principal Symbols

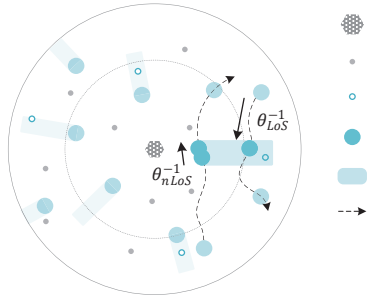
Обозначение	Описание
f_c	рабочая частота, Hz
W	выделенная полоса частот, Hz
r	радиус внутренней зоны, м
R	радиус внешней зоны, м
$!$	количество ресурсных блоков в выделенной полосе частот, ед. ресурса
$\tilde{C}(t)$	количество занятых ресурсных блоков в момент t
d_{ISD}	расстояние между соседними BS, м
$b_{LoS}^{r,U}, b_{LoS}^{r,M}$	требования одноадресных и многоадресных сессий во внутренней зоне при наличии прямой видимости, ед. ресурса
$b_{nLoS}^{r,U}, b_{nLoS}^{r,M}$	требования одноадресных и многоадресных сессий во внутренней зоне без прямой видимости, ед. ресурса
$b_{LoS}^{R,U}, b_{LoS}^{R,M}$	требования одноадресных и многоадресных сессий во внешней зоне при наличии прямой видимости, ед. ресурса
$b_{LoS}^{H,U}, b_{LoS}^{H,M}$	требования одноадресных и многоадресных хэндовер-сессий, ед. ресурса
ρ^U, ρ^M	плотность устройств, запрашивающих одноадресные и многоадресные соединения, м ²
λ^U, λ^M	интенсивность поступления одноадресных и многоадресных запросов от одного устройства, с ⁻¹
φ^U, φ^M	интенсивность обслуживания одноадресных и многоадресных сессий, с ⁻¹
θ_{LoS}	параметр распределения периодов между последовательными блокировками прямой видимости, с ⁻¹
θ_{nLoS}	параметр распределения длительности блокировки прямой видимости, с ⁻¹
B^U, B^M	вероятность сброса одноадресных и многоадресных сессий
$UTIL$	средняя доля занятого ресурса на BS, ед. ресурса

Поступившая в систему одноадресная заявка принимается на обслуживание, если в момент ее поступления в системе достаточно свободного ресурса, занимает один прибор и ресурс заданного объема, а по окончании обслуживания освобождает прибор и ресурс [14]. Поступившие в систему многоадресные заявки обслуживаются в соответствии с принципом мультивещания [13]. Многоадресная заявка, поступившая в систему, в которой нет многоадресных заявок, принимается на обслуживание, если в момент ее поступления в системе достаточно свободного ресурса, занимает ресурс заданного объема на все время обслуживания, а по окончании обслуживания освобождает занимаемый ресурс. Первая заявка, инициирующая сессию мультивещания, определяет длительность всей сессии мультивещания: все заявки, поступающие в систему на периоде обслуживания первой заявки, обслуживаются вместе с ней на выделенном для её обслуживания ресурсе, и покидают систему вместе с ней, тем самым завершая сессию. При этом прием в систему многоадресных заявок на периоде обслужи-



вания первой многоадресной заявки, открывшей сессию, может оставить без изменения либо увеличить объем занятого обслуживанием многоадресной сессии ресурса, но не может уменьшить его [18].

Движение блокираторов (рис. 3) моделируется с помощью двух экспоненциально распределенных с параметрами θ_{LoS} и θ_{nLoS} случайных величин – длительности интервала между соседними появлениями блокиратора прямой видимости (т.е. длительности нахождения UE в состоянии LoS) и длительности интервала блокировки прямой видимости (т.е. длительности нахождения UE в состоянии nLoS).



Р и с. 3. Модель движения блокираторов

Fig. 2. Scheme of a queuing system and resource distribution of a queuing system

Переданная на обслуживание в соседнюю BS заявка обслуживается в течение экспоненциально распределенного с параметром θ_{nLoS} интервала, а при отсутствии ресурса на основной BS и далее - либо до освобождения ресурса на основной BS, либо момента завершения обслуживания.

Приведем упрощающие предположения:

1. Начало обслуживания заявок всегда происходит в условиях прямой видимости (LoS).
2. Заявки, принятые на обслуживание на время блокировки прямой видимости до соседней BS, не могут находиться в состоянии блокировки на основной BS.

Имитационная модель системы

Для анализа построенной СМО был разработан программный комплекс на основе принципов дискретно-событийного имитационного моделирования [19]. Такой подход позволяет добиться высокой степени гибкости модели, а также исследовать различные сценарии и модели движения пользователей. Алгоритм работы имитационной модели представлен в виде псевдокода в таблице 2, в котором для удобства используется следующая функция-индикатор:

$$u^M(\tau, b') = \begin{cases} 0, & t = M, \text{ и нет многоадресных сессий с требованием } b \geq b', \\ 1, & \text{иначе.} \end{cases}$$

Т а б л и ц а 2. Псевдокод алгоритма имитационного моделирования

Table 2. Pseudocode of Simulation Algorithm

Алгоритм 1 Алгоритм имитационного моделирования процесса обслуживания одноадресного и многоадресного трафика в сети 5G NR

Входные параметры: $C, r, R, \mathbf{b}, \rho^U, \rho^M, \lambda^U, \lambda^M, \mu^U, \mu^M, T$

Выходные параметры: $B_U^U, B_M^U, UTIL$

Инициализация: $S^U = 0, S^M = 0, B^U = 0, B^M = 0, UTIL = 0, l_\tau = 0$

```

1: Сгенерировать координаты для  $N^U \sim Pois(\lambda^U \rho^U \pi R^2)$  и  $N^M \sim Pois(\lambda^M \rho^M \pi R^2)$  UE
2: for  $n = 1$  to  $N^U + N^M$  do
3:   Добавить события о приходе и завершении обслуживания первой сессии
4: end for
5: for  $\tau = 0$  to  $T$  do
6:   Обработать текущее событие  $E(\tau)$ 
7:   if  $E(\tau) =$  запрос на соединение  $t$ -типа then
8:     Добавить событие о приходе и завершении обслуживания следующей сессии  $t$ -типа
9:     if  $\tilde{C}(\tau) + b'_{LoS} \cdot u^M(\tau, b'_{LoS}) \leq C$  then
10:      Принять сессию на обслуживание:  $S^t = S^t + 1$ 
11:      Выделить ресурс  $b'_{LoS} \cdot u^M(\tau, b'_{LoS})$ 
12:     else
13:      Отказать в установлении соединения:  $B^t = B^t + 1$ 
14:     end if
15:   end if
16:   if  $E(\tau) =$  блокировка LoS сессии  $t$ -типа then
17:     if  $\tilde{C}(\tau) + (b'_{nLoS} - b'_{LoS}) \cdot u^M(\tau, b'_{nLoS}) \leq C$  then
18:       Продолжить обслуживание
19:     else
20:       Выделить дополнительный ресурс  $(b'_{nLoS} - b'_{LoS}) \cdot u^M(\tau, b'_{nLoS})$ 
21:     end if
22:     Сбросить сессию:  $B^t = B^t + 1$ 
23:   end if
24:   if  $E(\tau) =$  разблокировка LoS сессии  $t$ -типа then
25:     Продолжить обслуживание
26:     Освободить ресурс  $(b'_{nLoS} - b'_{LoS}) \cdot u^M(\tau, b'_{nLoS})$ 
27:   end if
28:   if  $E(\tau) =$  завершение обслуживания сессии  $t$ -типа then
29:     Освободить ресурс  $b^t \cdot u^M(\tau, b^t)$ 
30:   end if
31:    $UTIL = UTIL + \tilde{C}(\tau) \cdot (\tau - l_\tau)$ 
32:    $l_\tau = \tau$ 
33: end for
34:  $B^U = B^U / S^U$ 
35:  $B^M = B^M / S^M$ 
36:  $UTIL = (UTIL / T) \cdot 100$ 
37: return  $B_U^U, B_M^U, UTIL$ 

```



Для расчета требуемого количества радиоресурсов используются схемы модуляции и кодирования NR MCS, предложенные в⁸. Запрос на установление одноадресной сессии сбрасывается, если в момент его поступления объема доступных свободных ресурсов недостаточно для его обслуживания. В момент поступления многоадресного запроса он принимается с учетом других активных многоадресных сессий: если в момент поступления запроса в системе обслуживается хотя бы одна многоадресная сессия с большим или равным требованием к ресурсу, для установления новой сессии дополнительные ресурсы не выделяются, так как она может обслуживаться на том же ресурсе. Если же объем ресурса, занимаемый многоадресными сессиями, меньше, чем требование новой многоадресной сессии, она принимается на обслуживание только при условии наличия доступного дополнительного ресурса.

Поскольку все процессы в рассматриваемой системе по своей природе имеют стационарный режим, а пропускная способность системы ограничена, при определенных значениях параметров система всегда может достичь условий стационарного режима. Достижение стационарного режима определяется с помощью метода экспоненциально-взвешенного скользящего среднего с параметром сглаживания равным 0,05. При наступлении стационарного режима данные собираются как общее среднее из каждой последовательной группы по тысячу наблюдений, что позволяет избавиться от эффекта остаточной корреляции [20]. Среднее в каждой из групп наблюдений статистически не зависит от других групп, поэтому набор данных из средних чисел может быть исследован с помощью традиционных методов математической статистики.

Численный анализ

В данном разделе проводится численный анализ функционирования NR BS, обслуживающей трафик одноадресных и многоадресных соединений. В первой части раздела рассматриваются вероятности сброса одноадресных и многоадресных сессий, а также средняя доля используемого ресурса NR BS при фиксированном расстоянии ISD между базовыми станциями. Далее проводится анализ вышеперечисленных характеристик при изменении параметра ISD. Основные параметры [11, 21], используемые при вычислениях, представлены в таблице 3.

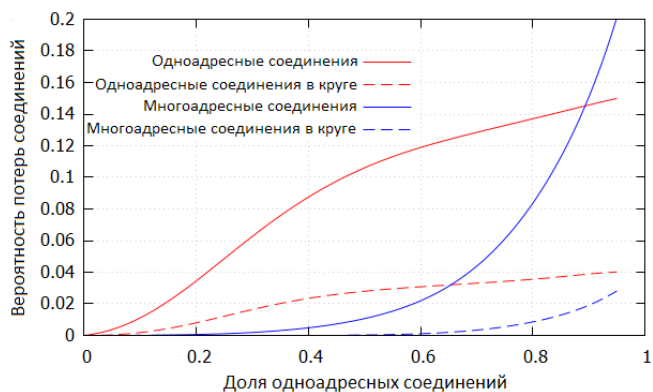
Таблица 3. Входные параметры и исходные данные
Table 3. Input Parameters and Initial Data

Обозначение	Описание	Значения
f_c	рабочая частота	28 ГГц
W	выделенная полоса частот	1 ГГц
S_A	ширина ресурсного блока (RB)	1,44 МГц
r_B	радиус блокиратора	0,4 м
P_T	мощность передающей антенны NR BS	0.2 Вт
G_T	усиление антенны	2,58 дБ
γ	коэффициент затухания сигнала	2,1
v	поддерживаемая скорость сессии	50 Мбит/с
R	радиус внешней зоны	400-800 м
C	количество ресурсных блоков в выделенной полосе частот	667
d_{ISD}	расстояние между соседними BS	600-1200 м

$b_{LoS}^{r,U}, b_{LoS}^{r,M}$	требования одноадресных и многоадресных сессий во внутренней зоне при наличии прямой видимости	16 ед.ресурса
$b_{nLoS}^{r,U}, b_{nLoS}^{r,M}$	требования одноадресных и многоадресных сессий во внутренней зоне без прямой видимости	158 ед.ресурса
$b_{LoS}^{r,U}, b_{LoS}^{r,M}$	требования одноадресных и многоадресных сессий во внешней зоне при наличии прямой видимости	31 ед.ресурса
$b_{LoS}^{h,U}, b_{LoS}^{h,M}$	требования одноадресных и многоадресных хэндовер-сессий	50 ед.ресурса
ρ^U, ρ^M	плотность устройств, использующих одноадресные и многоадресные соединения	0,001 UE/м ²
λ^U, λ^M	интенсивность поступления одноадресных и многоадресных запросов от одного устройства	10 ⁻³ А ⁻¹
α^U, α^M	интенсивность обслуживания одноадресных и многоадресных сессий	1/30 А ⁻¹
θ_{LoS}	параметр распределения периодов между последовательными блокировками прямой видимости	0,34 А ⁻¹

Рассмотрим поведение системы на примере характеристик, ориентированных на пользователя и на систему в целом при фиксированном расстоянии ISD. На рис. 4 представлены вероятности сброса одноадресных и многоадресных сессий в каждой из двух зон, определенных в физической модели, в зависимости от доли предложенной нагрузки одноадресных запросов $\frac{\rho^U}{\rho^U + \rho^M}$ при фиксированном значении ISD = 600 < и

общей предложенной нагрузке $\rho^U + \rho^M = 1 - @$. Как видно из рисунка, вероятность сброса многоадресных сессий экспоненциально растет с ростом доли одноадресной нагрузки. Однако вероятность сброса одноадресных сессий возрастает относительно медленно, при этом рост даже замедляется по мере достижения полной загрузки. Это объясняется тем, что трафик многоадресных сессий обслуживается с неявным резервированием ресурсов, и по этой причине имеет некоторый приоритет в обслуживании. В частности, даже при высоких значениях доли нагрузки одноадресных сессий вероятность того, что вновь поступившая многоадресная сессия сможет обслуживаться на ресурсе, уже занятом ранее другой активной многоадресной сессией, остается отличной от нуля. Так же можно отметить, что этот эффект наблюдается в обеих зонах обслуживания - как во внутренней, так и во внешней.



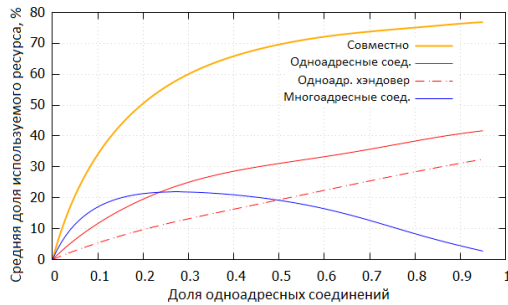
Р и с. 4. Вероятность сброса сессий при фиксированном значении ISD

F i g. 4. The probability of resetting sessions at a fixed ISD value

⁸ mmWave 5G NR prototype demo video // Qualcomm [Электронный ресурс]. URL: <https://www.qualcomm.com/videos/mmwave-5g-nr-prototype-demo-video> (дата обращения: 16.05.2019).

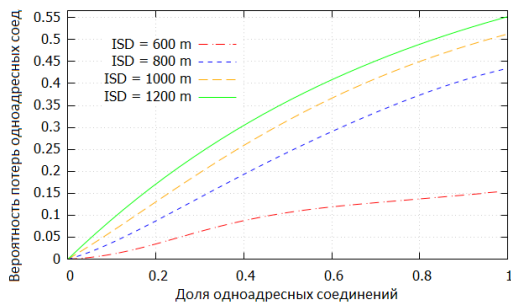


На рис. 5 изображена зависимость средней доли загрузки NR BS различными типами трафика от доли одноадресной нагрузки при фиксированном значении $ISD = 600 <$ и общей предложенной нагрузке $\rho^U + \rho^M = 1$ эрл. Нетрудно заметить, что доля загрузки системы растет с ростом доли одноадресных соединений. Причина в том, что с уменьшением доли одноадресной нагрузки в большей степени проявляет себя эффект переиспользования ресурсов многоадресными сессиями.



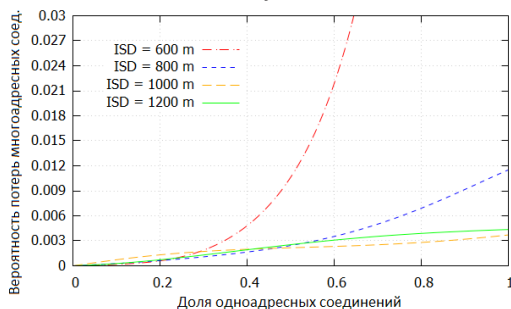
Р и с. 5. Средняя загрузка NR BS при фиксированном значении ISD
F i g. 5. Average load NR BS with a fixed ISD value

Теперь рассмотрим характеристики системы при различных значениях ISD. На рис. 6 изображены вероятности сброса одноадресных сессий для различных значений ISD в зависимости от доли нагрузки одноадресных соединений. Здесь можно заметить более резкий рост вероятности сброса при увеличении ISD с 600 до 800 метров, чем при увеличении с 800 до 1000 метров.



Р и с. 6. Вероятность сброса одноадресных сессий при различных значениях ISD
F i g. 6. Probability of resetting single-address sessions at different ISD values

На рис. 7 аналогичным образом отражены вероятности сброса для многоадресных сессий. При сравнении вероятностей сброса одноадресных и многоадресных сессий на рисунках 6 и 7, можно отметить, что значения у последних на ниже.



Р и с. 7. Вероятность сброса многоадресных сессий при различных значениях ISD
F i g. 7. Probability of resetting multiaddress sessions with different ISD values

Также довольно интересным наблюдением является тот факт, что вероятность сброса многоадресных сессий понижается с увеличением ISD, что нетипично для одноадресных сессий. Это вызвано тем, что увеличение расстояния между NR BS приводит к большим требованиям к ресурсам сети в расчете на пользователя, в то время как многоадресные сессии быстрее занимают достаточный объем ресурсов, за счёт чего снижается вероятность их сброса. Более того, данный эффект усиливается благодаря приходу хэндовер-сессий от соседних NR BS.

Заключение

Необходимость поддержки многоадресных соединений в будущих системах пятого поколения в миллиметровом диапазоне частот становится все более очевидной. В данной работе описано построение физической модели соты сети 5G NR, обслуживающей трафик одноадресных и многоадресных соединений и учитывающей эффект затухания сигнала при блокировке прямой видимости, который имеет ключевое значение в NR системах. Для анализа физической модели на основе принципов дискретно-событийного имитационного моделирования разработан программный комплекс, позволяющий производить расчет вероятностей сброса одноадресных и многоадресных соединений, а также средней загрузки системы.

Результаты численного анализа показывают, что наличие трафика многоадресных соединений оказывает серьезное влияние на производительность системы. В частности, многоадресные сессии создают эффект неявного резервирования ресурсов системы, получая при этом приоритет в обслуживании. Еще одним интересным наблюдением является то, что с увеличением расстояния между соседними NR BS вероятность сброса многоадресных соединений сокращается за счет резко растущей вероятности сброса одноадресных соединений. Таким образом, трафик многоадресных соединений может значительно снижать производительность системы в отношении одноадресных сессий, что порождает необходимость в дополнительных механизмах, позволяющих обеспечить требуемый уровень качества обслуживания обоих типов трафика.

В качестве задач дальнейших исследований предполагается получение аналитических выражений, которые позволят рассчитывать характеристики системы для последующего решения оптимизационных задач.

Список использованных источников

- [1] Kovalchukov R, Moltchanov D, Begishev V, Samuylov A, Andreev S, Koucheryavy Y, Samouylov K. Improved Session Continuity in 5G NR with Joint Use of Multi-Connectivity and Guard Bandwidth // 2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), Abu Dhabi, United Arab Emirates. 2018. Pp. 1-7. DOI: 10.1109/GLOCOM.2018.8647608
- [2] Petrov V, Lema M. A., Gapeyenko M., Antonakoglou K, Moltchanov D, Sardis F, Samuylov A, Andreev S, Koucheryavy Y, Dohler M. Achieving End-to-End Reliability of Mission-Critical Traffic in Softwarized 5G Networks // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 2018. Vol. 36, No. 3. Pp. 485-501. DOI: 10.1109/JSAC.2018.2815419
- [3] Shafi M., Molisch A.F., Smith P.J., Haustein T., Zhu P., De Silva P., Tufvesson F., Benjebbour A., Wunder G. 5G: A tutorial



- overview of standards, trials, challenges, deployment, and practice // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 2017. Vol. 35, No. 6. Pp. 1201-1221. DOI: 10.1109/JSAC.2017.2692307
- [4] *Gapeyenko M., Samuylov A., Gerasimenko M., Moltchanov D., Singh S. A., Riza M., Aryafar E., Himayat N., Andreev S., Koucheryavy Ye.* On the Temporal Effects of Mobile Blockers in Urban Millimeter-Wave Cellular Scenarios // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2017. Vol. 66, Issue 11. Pp. 10124-10138. DOI: 10.1109/TVT.2017.2754543
- [5] *Moltchanov D., Samuylov A., Petrov V., Gapeyenko M., Himayat N., Andreev S., Koucheryavy Ye.* Improving session continuity with bandwidth reservation in mmwave communications // IEEE Wireless Communications Letters. 2019. Vol. 8, No. 1. Pp. 105-108. DOI: 10.1109/LWC.2018.2859988
- [6] *Petrov V., Solomitckii D., Samuylov A., Lema M. A., Gapeyenko M., Moltchanov D., Andreev S., Naumov V., Samouylov K., Dohler M.* Dynamic Multi-connectivity Performance in Ultra-dense Urban mmWave Deployments // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 2017. Vol. 35, No. 9. Pp. 2038-2055. DOI: 10.1109/JSAC.2017.2720482
- [7] *Kim W., Song T., Pack S.* Rate adaptation for directional multicast in IEEE 802.11ad networks // 2012 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE), Las Vegas, NV. 2012. Pp. 364-365. DOI: 10.1109/ICCE.2012.6161903
- [8] *Park H., Park S., Song T., Pack S.* An incremental multicast grouping scheme for mmWave networks with directional antennas // IEEE Communications Letters. 2013. Vol. 17, No. 3. Pp. 616-619. DOI: 10.1109/LCOMM.2013.011513.122519
- [9] *Feng W., Li Y., Niu Y., Su L., Jin D.* Multicast spatial reuse scheduling over millimeter-wave networks // 2017 13th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), Valencia. 2017. Pp. 317-322. DOI: 10.1109/IWCMC.2017.7986306
- [10] *Biason A., Zorzi M.* Multicast via Point to Multipoint Transmissions in Directional 5G mmWave Communications // IEEE Communications Magazine. 2019. Vol. 57, Issue 2. Pp. 88-94. DOI: 10.1109/MCOM.2019.1700679
- [11] *Samuylov A., Moltchanov D., Krupko A., Kovalchukov R., Moskaleva E., Gaidamaka Yu.* Performance Analysis of Mixture of Unicast and Multicast Sessions in 5G NR Systems // Proceedings of 10th International Congress on Ultra-Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT – 2018). 2018. Pp. 1-7. DOI: 10.1109/ICUMT.2018.8631230
- [12] *Venugopal K., Valenti M. C., Heath R. W.* Analysis of Millimeter Wave Networked Wearables in Crowded Environments // Proceedings of 49th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers. 2015. Pp. 1-7. DOI: 10.1109/ACSSC.2015.7421261
- [13] *Basharin G., Gaidamaka Y., and Samouylov K.* Mathematical theory of teletraffic and its application to the analysis of multiservice communication of next generation networks // Automatic Control and Computer Sciences. 2013. Vol. 47. Pp. 62-69. DOI: 10.3103/S0146411613020028
- [14] *Наумов В. А., Самуйлов А. К.* Модель выделения ресурсов беспроводной сети объемами случайной величины // Вестник РУДН. Серия: Математика. Информатика. Физика. 2015. № 2. С. 38-45. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23523630> (дата обращения: 16.05.2019).
- [15] *Naumov V., Samouylov K.* Analysis of multi-resource loss system with state-dependent arrival and service rates // Probability in the Engineering and Informational Sciences. 2017. Vol. 31, Issue 4. Pp. 413-419. DOI: 10.1017/S0269964817000079
- [16] *Samouylov K., Naumov V., Sopin E., Gudkova I., Shorgin S.* Sojourn Time Analysis for Processor Sharing Loss System with Unreliable Server // Analytical and Stochastic Modelling Techniques and Applications. ASMTA 2016. Lecture Notes in Computer Science / S. Wittevrongel, T. Phung-Duc (eds). Springer, Cham, 2016. Vol. 9845. Pp. 284-297. DOI: 10.1007/978-3-319-43904-4_20
- [17] *Gudkova I., Samouylov K., Buturlin I., Borodakiy V., Gerasimenko M., Galinina O., Andreev S.* Analyzing Impacts of Coexistence between M2M and H2H Communication on 3GPP LTE System // Wired/Wireless Internet Communications. WWIC 2014. Lecture Notes in Computer Science / A. Mellouk, S. Fowler, S. Hoceni, B. Daachi (eds). Springer, Cham, 2014. Vol. 8458. Pp. 62-174. DOI: 10.1007/978-3-319-13174-0_13
- [18] *Samouylov K., Gaidamaka Y.* Analysis of loss systems with overlapping resource requirements // Statistical Papers. 2018. Vol. 59, No. 4. Pp. 1463-1470. DOI: 10.1007/s00362-018-1041-x
- [19] *Бусленко Н. П.* Моделирование сложных систем. М.: Наука, 1968. 356 с.
- [20] *Mezzavilla M., Zhang M., Polese M., Ford R., Dutta S., Rangan S., Zorzi M.* End-to-End Simulation of 5G mmWave Networks // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2018. Vol. 20, Issue 3. Pp. 2237-2263. DOI: 10.1109/COMST.2018.2828880
- [21] *Borodakiy V. Y., Samouylov K. E., Gudkova I. A., Markova E. V.* Analyzing Mean Bit Rate of Multicast Video Conference in LTE Network with Adaptive Radio Admission Control Scheme // Journal of Mathematical Sciences. 2016. Vol. 218, Issue 3. Pp. 257-268. DOI: 10.1007/s10958-016-3027-3

Поступила 16.05.2019; принята к публикации 20.06.2019;
опубликована онлайн 25.07.2019.

Об авторах:

Бесчастный Виталий Александрович, аспирант кафедры прикладной информатики и теории вероятностей, факультет физико-математических и естественных наук, Российский университет дружбы народов (117198, Россия, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6), ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1373-4014>, beschastnyy-va@rudn.ru

Гайдамака Юлия Васильевна, профессор кафедры прикладной информатики и теории вероятностей, факультет физико-математических и естественных наук, Российский университет дружбы народов (117198, Россия, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6), старший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук (119333, Россия, г. Москва, ул. Вавилова, д. 44-2), доктор физико-математических наук, доцент, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2655-4805>, gaydamaka-yuv@rudn.ru



Благодарности: авторы выражают благодарность заведующему кафедрой прикладной информатики и теории вероятностей Российского университета дружбы народов профессору К. Е. Самуйлову, а также доценту данной кафедры Д. А. Молчанову за плодотворные дискуссии по теме исследований, которые помогли в планировании численного эксперимента.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

References

- [1] Kovalchukov R., Moltchanov D., Begishev V., Samuylov A., Andreev S., Koucheryavy Y., Samouylov K. Improved Session Continuity in 5G NR with Joint Use of Multi-Connectivity and Guard Bandwidth. *2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*. Abu Dhabi, United Arab Emirates. 2018; p. 1-7. (In Eng.) DOI: 10.1109/GLOCOM.2018.8647608
- [2] Petrov V., Lema M.A., Gapeyenko M., Antonakoglou K., Moltchanov D., Sardis F., Samuylov A., Andreev S., Koucheryavy Y., Dohler M. Achieving End-to-End Reliability of Mission-Critical Traffic in Software-defined 5G Networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 2018; 36(3):485-501. (In Eng.) DOI: 10.1109/JSAC.2018.2815419
- [3] Shafi M., Molisch A.F., Smith P.J., Haustein T., Zhu P., De Silva P., Tufvesson F., Benjebbour A., Wunder G. 5G: A tutorial overview of standards, trials, challenges, deployment, and practice. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 2017; 35(6):1201-1221. (In Eng.) DOI: 10.1109/JSAC.2017.2692307
- [4] Gapeyenko M., Samuylov A., Gerasimenko M., Moltchanov D., Singh S.A., Riza M., Aryafar E., Himayat N., Andreev S., Koucheryavy Ye. On the Temporal Effects of Mobile Blockers in Urban Millimeter-Wave Cellular Scenarios. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2017; 66(11):10124-10138. (In Eng.) DOI: 10.1109/TVT.2017.2754543
- [5] Moltchanov D., Samuylov A., Petrov V., Gapeyenko M., Himayat N., Andreev S., Koucheryavy Ye. Improving session continuity with bandwidth reservation in mmwave communications. *IEEE Wireless Communications Letters*. 2019; 8(1):105-108. (In Eng.) DOI: 10.1109/LWC.2018.2859988
- [6] Petrov V., Solomitckii D., Samuylov A., Lema M.A., Gapeyenko M., Moltchanov D., Andreev S., Naumov V., Samouylov K., Dohler M. Dynamic Multi-connectivity Performance in Ultra-dense Urban mmWave Deployments. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 2017; 35(9):2038-2055. (In Eng.) DOI: 10.1109/JSAC.2017.2720482
- [7] Kim W., Song T., Pack S. Rate adaptation for directional multicast in IEEE 802.11ad networks. *2012 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE)*. Las Vegas, NV. 2012; p. 364-365. (In Eng.) DOI: 10.1109/ICCE.2012.6161903
- [8] Park H., Park S., Song T., Pack S. An incremental multicast grouping scheme for mmWave networks with directional antennas. *IEEE Communications Letters*. 2013; 17(3):616-619. (In Eng.) DOI: 10.1109/LCOMM.2013.011513.122519
- [9] Feng W., Li Y., Niu Y., Su L., Jin D. Multicast spatial reuse scheduling over millimeter-wave networks. *2017 13th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)*. Valencia. 2017; p. 317-322. (In Eng.) DOI: 10.1109/IWCMC.2017.7986306
- [10] Bignon A., Zorzi M. Multicast via Point to Multipoint Transmissions in Directional 5G mmWave Communications. *IEEE Communications Magazine*. 2019; 57(2):88-94. (In Eng.) DOI: 10.1109/MCOM.2019.1700679
- [11] Samuylov A., Moltchanov D., Krupko A., Kovalchukov R., Moskaleva F., Gaidamaka Yu. Performance Analysis of Mixture of Unicast and Multicast Sessions in 5G NR Systems. *Proceedings of 10th International Congress on Ultra-Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT - 2018)*. 2018; p. 1-7. (In Eng.) DOI: 10.1109/ICUMT.2018.8631230
- [12] Venugopal K., Valenti M.C., Heath R.W. Analysis of Millimeter Wave Networked Wearables in Crowded Environments. *Proceedings of 49th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*. 2015; p. 1-7. (In Eng.) DOI: 10.1109/ACSSC.2015.7421261
- [13] Basharin G., Gaidamaka Y., and Samouylov K. Mathematical theory of teletraffic and its application to the analysis of multiservice communication of next generation networks. *Automatic Control and Computer Sciences*. 2013; 47:62-69. (In Eng.) DOI: 10.3103/S0146411613020028
- [14] Naumov V.A., Samuylov A.K. Queuing System with Resource Allocation of the Random Volume. *RUDN Journal of Mathematics, Information Sciences and Physics*. 2015; 2:38-45. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23523630&> (accessed 16.05.2019). (In Russ., abstract in Eng.)
- [15] Naumov V., Samouylov K. Analysis of multi-resource loss system with state-dependent arrival and service rates. *Probability in the Engineering and Informational Sciences*. 2017; 31(4):413-419. (In Eng.) DOI: 10.1017/S0269964817000079
- [16] Samouylov K., Naumov V., Sopin E., Gudkova I., Shorgin S. Sojourn Time Analysis for Processor Sharing Loss System with Unreliable Server. In: Wittevrongel S., Phung-Duc T. (eds). *Analytical and Stochastic Modelling Techniques and Applications. ASMTA 2016. Lecture Notes in Computer Science*. Springer, Cham. 2016; 9845:284-297. (In Eng.) DOI: 10.1007/978-3-319-43904-4_20
- [17] Gudkova I., Samouylov K., Buturlin I., Borodakiy V., Gerasimenko M., Galinina O., Andreev S. Analyzing Impacts of Coexistence between M2M and H2H Communication on 3GPP LTE System. In: Mellouk A., Fowler S., Hoceini S., Daachi B. (eds). *Wired/Wireless Internet Communications. WWIC 2014. Lecture Notes in Computer Science*. Springer, Cham. 2014; 8458:62-174. (In Eng.) DOI: 10.1007/978-3-319-13174-0_13
- [18] Samouylov K., Gaidamaka Y. Analysis of loss systems with overlapping resource requirements. *Statistical Papers*. 2018; 59(4):1463-1470. (In Eng.) DOI: 10.1007/s00362-018-1041-x
- [19] Buslenko N. P. *Modelirovanie slozhnykh system* [Complex Systems Modeling]. Moscow, Nauka, 1968. 356 p. (In Russ.)
- [20] Mezzavilla M., Zhang M., Polese M., Ford R., Dutta S., Rangan S., Zorzi M. End-to-End Simulation of 5G mmWave Networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2018; 20(3):2237-2263. (In Eng.) DOI: 10.1109/COMST.2018.2828880



- [21] Borodakiy V.Y., Samouylov K.E., Gudkova I.A., Markova E.V. Analyzing Mean Bit Rate of Multicast Video Conference in LTE Network with Adaptive Radio Admission Control Scheme. *Journal of Mathematical Sciences*. 2016; 218(3):257-268. (In Eng.) DOI: 10.1007/s10958-016-3027-3

Submitted 16.05.2019; revised 20.06.2019;
published online 25.07.2019.

About the authors:

Vitalii A. Beschastnyi, PhD Student Applied Probability and Informatics Department, Peoples' Friendship University of Russia (6 Miklukho-Maklaya St., Moscow 117198, Russia), ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1373-4014>, beschastnyy-va@rudn.ru

Yuliya V. Gaidamaka, Professor, Applied Probability and Informatics Department, Peoples' Friendship University of Russia (6 Miklukho-Maklaya St., Moscow 117198, Russia), senior scientist, Federal Research Center "Computer Science and Control" of the Russian Academy of Sciences (44-2 Vavilov St., Moscow 119333, Russia), Dr.Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2655-4805>, gaydamaka-yuv@rudn.ru

Acknowledgments: The authors are grateful to the head of the Department of Applied Informatics and Probability Theory of Peoples' Friendship University of Russia Professor K. E. Samuylov, as well as to the Assistant Professor of this department D. A. Molchanov for fruitful discussions on the topic of research that helped in planning the numerical experiment.

All authors have read and approved the final manuscript.

