

УДК 621.396.41

Я.В. Крюков, Д.А. Покаместов, Е.В. Рогожников, С.А. Новичков, Д.В. Лаконцев

Математическая модель оценки вероятности коллизий преамбул при случайном доступе в сценарии массового межмашинного взаимодействия

Сценарий массового межмашинного взаимодействия mMTC является одним из ключевых в сотовой системе связи пятого поколения 5G New Radio. В одной соте mMTC могут одновременно работать десятки тысяч устройств, которые асинхронно отправляют данные в точку сбора информации. Это является причиной возникновения неизбежных коллизий преамбул при процедуре случайного доступа. Для достоверной оценки вероятности коллизий используются математические модели генерирования трафика от большого количества устройств внутри соты. Большинство существующих моделей основано на подходе генерирования агрегированного трафика от всех устройств и не позволяет учитывать текущее состояние каждого отдельного устройства mMTC, что снижает достоверность модельных исследований. Для решения этой проблемы нами предложена математическая модель генерирования трафика (преамбул) в канале случайного доступа, учитывающая матрицу переходных состояний дискретной цепи Маркова. Такой подход позволяет более достоверно описать синхронную и асинхронную передачу преамбул внутри соты. Разработанная модель предназначена для оценки вероятности коллизий при осуществлении процедуры случайного доступа в сценарии mMTC, учитывающая синхронную и асинхронную передачу преамбул.

Ключевые слова: 5G NR, mMTC, коллизия, случайный доступ, модель трафика.

doi: 10.21293/1818-0442-2021-24-3-33-37

Начиная с 2020 г. в мире началось широкомаштабное развертывание сетей беспроводного широкополосного доступа пятого поколения (5G), которые разработаны консорциумом 3rd Generation Partnership Project (3GPP) и получили название New Radio (NR). Сети предыдущих поколений были ориентированы, в первую очередь, на предоставление услуг голосовой связи и широкополосного доступа в сеть интернет для абонентов. Однако стремительное развитие концепции «интернета вещей» стало причиной необходимости обеспечения беспроводным подключением огромного количества устройств, которые не привязаны к конкретному абоненту (человеку), а являются частью инфраструктуры (промышленной, городской и т.д.). В рамках стандарта 5G NR для таких устройств предусмотрен новый тип сервиса, который называется Massive Machine Type Communication (mMTC) и ориентирован на оптимизацию использования сетевых ресурсов для поддержки большого количества стабильных соединений, приходящихся на единицу площади (высокая плотность сетевых устройств).

Трафик mMTC имеет две ключевые особенности. Он является однородным, потому что множество устройств могут генерировать одинаковый трафик. К тому же трафик mMTC может быть синхронным, потому что множество устройств одновременно реагирует на глобальные события внутри соты (например, опрос сетевых устройств или перезагрузка сети).

Для передачи трафика каждое устройство подключается к RAN (Radio Access Network, сеть радиодоступа) [1]. Для этого используется процедура RA (Random Access, случайный доступ) [2], которая широко используется в существующих сотовых системах связи. Для первичного подключения к узловой

станции (gNB) пользовательское устройство генерирует специальную преамбулу и передает ее по восходящему каналу. Для gNB время прихода, частотный подканал и тип преамбулы являются случайными. После декодирования преамбулы gNB отправляет ответное сообщение с инструкциями для дальнейшего подключения.

Проблема заключается в том, что передача преамбулы не координируется gNB, поэтому несколько пользовательских устройств могут одновременно начать ее отправку. В этом случае на стороне gNB возникает коллизия, которая успешно разрешается при малом количестве устройств. Однако при большом количестве устройств вероятность возникновения коллизии повышается, а вероятность ее разрешения существенно снижается. Кроме того, синхронная инициация процедуры RA также приведет к росту вероятности коллизий. Поэтому актуальной задачей является разработка математических моделей для генерирования трафика RA в сценарии mMTC с большим количеством устройств, чтобы получить достоверную оценку вероятности коллизий.

Чаще всего для моделирования трафика используется два подхода: генерирование трафика от отдельного источника или генерирование агрегированного потока трафика от всех источников [3]. Большинство существующих моделей основано на втором подходе, потому что временное распределение входящего трафика легко описывается распределением Пуассона. Базовая модель 3GPP для моделирования трафика, основанная на втором подходе, представлена в [4].

Однако такие модели не позволяют учитывать поведение каждого отдельного устройства mMTC, поэтому существуют более сложные модели генери-

рования трафика, которые основаны на первом подходе. Они позволяют генерировать трафик каждого конкретного сетевого устройства, учитывая его текущее состояние и модель поведения. Существенной проблемой таких моделей является стремительный рост вычислительной сложности при увеличении количества устройств.

Решая эту проблему, в работах [5, 6] предложен подход моделирования трафика с помощью цепей Маркова. Такая модель позволяет генерировать синхронный и асинхронный трафик, а также учитывать набор конечных состояний устройств и вероятности перехода между состояниями.

В своей работе мы предлагаем собственную математическую модель для оценки вероятности коллизий в сценарии mMTC, используя модель генерирования трафика [5].

Модель 3GPP для генерирования трафика

Модель 3GPP является одной из самых часто используемых математических моделей для генерирования mMTC трафика. Она позволяет рассчитать временное распределение среднего количества принимаемых пакетов в заданном временном интервале. Поскольку в нашей работе рассматривается процедура случайного доступа, то под передачей пакета подразумевается передача преамбулы. Модель 3GPP включает в себя два сценария для генерирования асинхронного и синхронного трафика соответственно. Сценарии отличаются друг от друга законом распределения вероятности прибытия преамбул $f(t)$ на временном интервале $[0, T]$ с периодом дискретизации Δt . В дискретной модели $t = k\Delta t$, где $k = 1, 2, \dots, K$ – номер дискретного отсчета, а K – общее количество дискретных отсчетов на временном интервале $[0, T]$. Поскольку преамбула размещается внутри единого радиокадра длительностью 10 мс [7], то дискретом модели выбрана длительность одного радиокадра в 5G NR, поэтому $\Delta t = 10$ мс. В этом случае k будет означать порядковый номер принимаемого радиокадра.

Характеристики моделей и их различия приведены в таблице [4].

Характеристики моделей 3GPP

Характеристика	Модель 1 ($m = 1$)		Модель 2 ($m = 2$)	
	1000	3000	5000	10000 30000
Тип трафика	Несинхронный		Синхронный	
Закон $f(t)$	Равномерное		Beta (3,4)	
Период, T	60 с		10 с	

Предполагается, что каждое из N устройств совершит одну передачу за временной период T , поэтому суть моделирования сводится к распределению N принимаемых преамбул во времени. Функция равномерного распределения для модели 1 рассчитывается согласно

$$f_1(k) = 1/K. \tag{1}$$

Распределение $f_2(k)$ для модели 2 может быть представлено [4] в виде

$$f_2(k) = \frac{(\Delta t \cdot k)^{\alpha-1} \cdot (T - \Delta t \cdot k)^{\beta-1}}{T^{\alpha+\beta-1} \cdot \text{Beta}\{\alpha, \beta\}}, \tag{2}$$

где $\text{Beta}\{\cdot\}$ – бета-функция с параметрами $\alpha = 3, \beta = 4$.

Обозначим среднее количество принимаемых преамбул в k -й временной отсчет величиной $\lambda(k)$. Тогда $\lambda(k)$ для N устройств может быть вычислена с помощью выражения

$$\lambda_m(k) = N \cdot f_m(k). \tag{3}$$

На рис. 1 приведены $\lambda_1(k\Delta t)$ и $\lambda_2(k\Delta t)$ для $T = 10$ с, $N = 30000$ и $\Delta t = 10$ мкс.

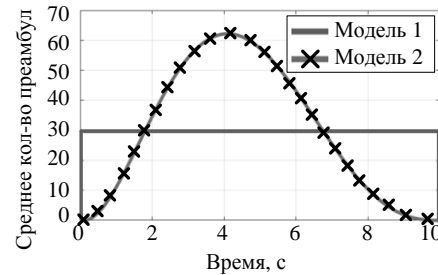


Рис. 1. Среднее количество принимаемых преамбул

Модель СММРР для генерирования трафика

Модель СММРР (Coupled Markov Modulated Poisson Processes) [5, 6] разработана для генерирования синхронного и асинхронного трафиков в сети с большим количеством устройств mMTC. Она позволяет преодолеть основные ограничения базовой модели 3GPP и учитывать состояние каждого конкретного устройства. Для этого предлагается совместное использование Марковских и Пуассоновских процессов.

Каждое n -е устройство описывается набором состояний s_n Марковской цепи и квадратной матрицей вероятностей смены состояний P_n , а каждому состоянию соответствует определенный объем и тип передаваемого трафика. Примером может служить упрощенная модель устройства с двумя состояниями: 1) регулярная передача полезного трафика, 2) редкая передача служебного трафика.

Матрица P_n выглядит следующим образом:

$$P_n = \begin{pmatrix} p_{1,1}^{(n)} & p_{1,2}^{(n)} & \dots \\ p_{2,1}^{(n)} & p_{2,2}^{(n)} & \\ \vdots & & \ddots \end{pmatrix},$$

где $p_{a,b}^{(n)}$ – вероятность перехода из состояния b в состояние a устройства n . Общее число состояний обозначается символом I , а вероятность каждого состояния описывается вектором π_n :

$$\pi_n = \begin{pmatrix} \pi_{1,n} \\ \pi_{2,n} \\ \vdots \end{pmatrix}.$$

Величины P_n и π_n связаны балансным уравнением [5, 6]

$$\pi_n = P_n \pi_n, \quad (4)$$

где π_n – это собственный вектор матрицы P_n при собственном числе матрицы P_n , равном единице.

Для всех устройств mMTC авторы определяют матрицы P_C и P_U , которые соответствуют синхронному и асинхронному режимом передачи соответственно. Обе матрицы являются входной переменной и инициализируются при моделировании. Общий для всех устройств процесс перехода к синхронному состоянию описывается величиной $\theta(k) \in [0,1]$, где $\theta(k) = 0$ означает асинхронную и $\theta(k) = 1$ – синхронную передачу. Вводится параметр $\delta_n \in [0,1]$, который назначается каждому n -му устройству и интерпретируется как близость устройства к эпицентру синхронной передачи.

Далее вычисляется выражение для определения вероятности нахождения каждого n -го устройства в состоянии синхронной передачи

$$\theta_n(k) = \delta_n \theta(k). \quad (5)$$

Используя P_C и P_U , вычисляется матрица смены состояний $P_n(k)$ каждого n -го устройства в момент времени k по формуле

$$P_n(k) = \theta_n(k)P_C + (1 - \theta_n(k))P_U. \quad (6)$$

Используя матрицу $P_n(k)$, можно в каждый временной отсчет определять вероятность нахождения n -го устройства в одном из I состояний.

Расчет вероятности коллизий преамбул PRACH

Как говорилось ранее, для инициализации случайного доступа устройство посылает одну из преамбул в определенном частотно-временном сегменте радиокadra. Количество доступных для передачи преамбул зависит от конфигурации канала PRACH (Physical Random Access Channel) [8], а сама преамбула выбирается случайно из общего пула размерностью L . Например, для 6-й конфигурации PRACH определено $L = 54$ преамбулы.

Считается, что коллизия произошла в том случае, если в одном и том же радиокadre передаются как минимум 2 одинаковые преамбулы. В случае коллизии преамбулы могут быть успешно детектированы, а вероятность успешного детектирования зависит от энергетических параметров принятого сигнала и интерференционной помехи. В рамках нашей работы вероятность успешного детектирования не рассматривается.

Согласно приложению Б технической рекомендации [8], вероятность коллизии $\rho_c(k)$ преамбулы в k -м радиокadre может быть получена по формуле

$$\rho_c(k) = 1 - e^{-\frac{\lambda(k)}{L}}. \quad (7)$$

На рис. 2 приведены зависимости $\rho_c(k\Delta t)$, полученные с помощью (7) для $\lambda_1(k\Delta t)$ и $\lambda_2(k\Delta t)$ из модели 3GPP с используемой ранее конфигурацией (см. рис. 1) и $L = 54$.

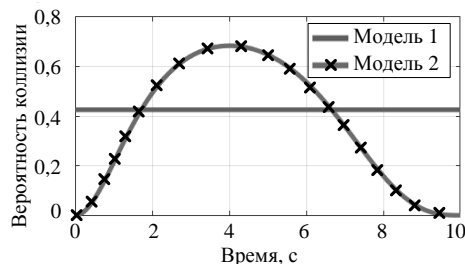


Рис. 2. Вероятность коллизии

Предлагаемая модель оценки вероятности коллизий

Предлагаемая нами математическая модель позволяет получить оценку вероятности коллизий преамбул ρ_c во временном интервале $[0, T]$ для N устройств mMTC в сети, учитывая синхронный и асинхронный режимы передачи. Предполагается, что устройства могут находиться в двух состояниях: 1) не требуется передача преамбулы (сон, регулярная передача данных и т.д.); 2) требуется передача преамбулы.

Асинхронный режим отражает обычное рабочее состояние сети, в котором все устройства передают данные независимо друг от друга. Синхронный режим отражает стрессовое состояние сети, которое может быть вызвано, например, её перезагрузкой и потерей соединения между устройствами и gNB. В этом случае часть устройств одновременно переходит в состояние 2 и начинает процедуру случайного доступа для повторного подключения. Для синхронного режима свойственны взрывное увеличение количества принимаемых преамбул и рост ρ_c .

Наш подход заключается в расчете вероятности коллизий преамбул ρ_c с помощью выражения (7) из технической рекомендации [8], заранее вычислив количество устройств в состоянии передачи преамбул с помощью модели CMMPP, используя распределения f_1, f_2 из модели 3GPP в качестве функции перехода между асинхронным и синхронным режимами передачи.

Процедура моделирования включает в себя следующие этапы:

1. Процесс перехода к синхронному состоянию инициализируется распределением f_1 или f_2 , поэтому $\theta(k) = f_1(k)$ (1) или $\theta(k) = f_2(k)$ (2).

2. Инициализируется вектор значений δ , учитывая $\delta \in [0,1]$.

3. Объявляются общие для всех устройств матрицы смены состояний размерностью 2×2 в синхронном P_C и асинхронном P_U режимах.

4. Рассчитывается вектор вероятности состояний $\pi_n(k)$ из (4), предварительно рассчитав (5) и (6). Обозначим вероятность нахождения n -го устройства в состоянии передачи преамбулы в k -й временной отсчет с помощью переменной $w_n(k)$. Предполагается, что процедура случайного доступа выполняется один раз, поэтому устройство может единожды находиться в этом состоянии. Если сумма вероятностей

w_n на временном интервале $1, 2, \dots, k$ превышает 1, то на оставшемся интервале $k+1, \dots, K$ устройство n принудительно переводится в состояние 1. Поэтому

$$\begin{cases} w_n(k) = \pi_{2,n}(k), \text{ если } \sum_{m=1}^k \pi_{2,n}(m) < 1; \\ w_n(k) = 0, \text{ иначе.} \end{cases}$$

5. Рассчитывается среднее количество принимаемых преамбул $\lambda(k)$ с помощью формулы

$$\lambda(k) = \sum_{n=1}^N w_n(k). \quad (8)$$

6. Рассчитывается вероятность коллизий $\rho_c(k)$ с помощью (7), используя результат (8).

Результат моделирования

Для демонстрации работы модели на рис. 3 приведен результат моделирования для следующей конфигурации: $N = 5000$, $T = 10$ с, $\Delta t = 10$ мкс, $L = 54$, $\theta \sim f_2$, распределение δ подчиняется равномерному закону распределения от 0 до 1, т.е. $\delta \sim U[0,1]$. Используются матрицы вероятностей смены состояний:

$$\mathbf{P}_C = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{P}_U = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

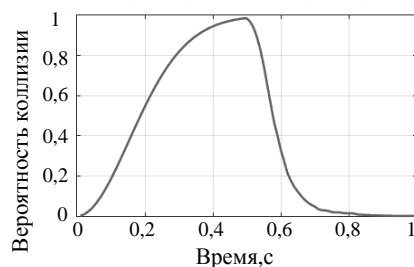


Рис. 3. Вероятность коллизий, полученная с помощью предлагаемой модели

На рис. 3 временная ось ограничена 1 с, потому что за это время все устройства успевают передать преамбулу. Высокая вероятность коллизий в начале временного интервала связана с тем, что большое количество устройств быстро переходит в синхронный (практически одновременный) режим отправки преамбул. После передачи преамбулы устройства переходят в состояние 1 и количество принимаемых преамбул существенно уменьшается, что снижает вероятность коллизий на оставшемся временном интервале. Такое поведение связано с выбранными вероятностными характеристиками моделирования, которые являются причиной быстрого перехода системы в синхронный режим.

Предлагаемая модель генерирования трафика в канале случайного доступа основана на модели СММРР, поэтому обладает эквивалентной вычислительной сложностью, сравнительный анализ которой приведен в [5]. По сравнению с моделью 3GPP, разработанная модель позволяет симуляцию потока преамбул для более широкого диапазона сценариев, учитывая синхронную и асинхронную передачу, а также различные состояния устройств.

Заключение

В одной соте 5G NR могут одновременно обслуживаться десятки тысяч устройств mMTC, поэтому особое внимание уделяется проблеме коллизий при

выполнении процедуры случайного доступа. Адекватность оценки коллизий напрямую зависит от используемой модели генерирования и отправки преамбул случайного доступа. Модели, рекомендованные 3GPP, основаны на подходе генерирования агрегированного потока преамбул от всех источников. Однако, для более точного описания трафика необходимы модели, в которых каждый источник представлен в виде отдельного объекта с возможным набором состояний.

В работе предложена математическая модель для симуляции трафика в канале случайного доступа, основанная на подходе СММРР вычислительной сложности и, в отличие от 3GPP, позволяет симуляцию потока преамбул для более широкого диапазона сценариев, учитывая синхронную и асинхронную передачу, а также различные состояния устройств.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минцифры России и АО «РВК», а также Сколковского института науки и технологий, идентификатор соглашения предоставления субсидии 0000000007119P190002, № 005/20 от 26.03.2020 г.

Литература

1. Comprehensive Survey of RAN Architectures Toward 5G Mobile Communication System / M.A. Habibi, M. Nasimi, B. Han, H.D. Schotten // IEEE Access. – 2019. – Vol. 7. – P. 70371–70421.
2. De Andrade T.P. The random access procedure in long term evolution networks for the Internet of Things // IEEE Communications Magazine. – 2017. – Vol. 55, No. 3. – P. 124–131.
3. Cheng R.G. RACH collision probability for machine-type communications // IEEE 75th Vehicular Technology Conference. – 2012. – P. 1–5.
4. 3GPP TR 37.868, 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Study on RAN Improvements for Machine-type Communications; (Release 10) v. 0.6.1 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://itctec.com/archive/3gpp-specification-tr-37-868>, свободный (дата обращения: 28.09.2021).
5. Traffic models for machine type communications / M. Laner, P. Svoboda, N. Nikaein, M. Rupp // The Tenth International Symposium on Wireless Communication Systems. – 2013. – P. 1–5.
6. Traffic models for machine-to-machine (M2M) communications: types and applications / M. Laner, P. Svoboda, N. Nikaein, M. Rupp // Machine-to-machine (M2M) Communications. – 2015. – P. 133–154.
7. 3GPP TS 38.300, 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; NR; NR and NG-RAN Overall Description; Stage 2 (Release 16) v.16.3.0 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/138300_138399/138300/15.08.00_60/ts_138300v150800p.pdf, свободный (дата обращения: 28.09.2021).
8. 3GPP R1-061369, LTE random-access capacity and collision probability [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.3gpp.org/ftp/tsg_ran/WG1_RL1/TSGR_1_45/Docs/R1-061369.zip, свободный (дата обращения: 28.09.2021).

Крюков Яков Владимирович

Канд. техн. наук, доцент каф. телекоммуникаций и основ радиотехники (ТОР) Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 41-33-98
Эл. почта: kryukov.tusur@gmail.com

Покаместов Дмитрий Алексеевич

Канд. техн. наук, доцент каф. ТОР ТУСУРа
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 41-33-98
Эл. почта: dmaltomsk@mail.ru

Рогожников Евгений Васильевич

Канд. техн. наук, зав. каф. ТОР ТУСУРа
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 41-33-98
Эл. почта: udzhon@mail.ru

Новичков Серафим Алексеевич

Гл. конструктор лидирующего исследовательского центра
«Сеть радиодоступа 5G с открытой архитектурой», Сколтех
Большой бульвар 30, стр. 1, г. Москва, Россия, 121205
Тел.: +7 (495-2) 80-14-81
Эл. почта: S.Novichkov@skoltech.ru

Лаконцев Дмитрий Владимирович

Канд. техн. наук, доцент, руководитель центра
компетенций национальной технической инициативы
«Технологии беспроводной связи и интернета вещей», Сколтех
Большой бульвар 30, стр. 1, г. Москва, Россия, 121205
Тел.: +7 (495-2) 80-14-81
Эл. почта: d.lakontsev@skoltech.ru

Kryukov Ya.V., Pokamestov D.A.,

Rogozhnikov E.V., Novichkov S.A., Lakontsev D.V.

Math model for estimating the probability of preambles collisions within random access in the mMTC scenario

The mass machine-to-machine communication (mMTC) scenario is one of the key ones in 5G cellular communication system. Tens of thousands of devices can operate simultaneously in one mMTC cell, sending data asynchronously to the data collection point. This is the reason for the occurrence of unavoidable collisions of preamble in the random access procedure. Mathematical models of traffic generation from a large number of devices within a cell are used to reliably estimate the probability of collisions. Most existing models are based on the approach of generating aggregated traffic from all devices and do not allow taking into account the current state of each individual device, which reduces the reliability of model studies. To solve this problem, we propose a mathematical model for generating traffic (preambles) in a random access channel, taking into account the transition state matrix of a discrete Markov chain. This approach allows to describe more reliably the synchronous and asynchronous transmission of preambles within a cell. The developed model is designed to estimate the collision probability of the random access procedure in the mMTC scenario, taking into account the synchronous and asynchronous transmission of preambles.

Keywords: 5G NR, mMTC, collision, random access, traffic model.

doi: 10.21293/1818-0442-2021-24-3-33-37

References

1. Comprehensive Survey of RAN Architectures Toward 5G Mobile Communication System / M.A. Habibi, M. Nasimi, B. Han, H.D. Schotten // IEEE Access, 2019, vol. 7, pp. 70371–70421.

2. De Andrade T.P. The random access procedure in long term evolution networks for the Internet of Things // IEEE Communications Magazine, 2017, vol. 55, no. 3, pp. 124–131.

3. Cheng R.G. RACH collision probability for machine-type communications // IEEE 75th Vehicular Technology Conference, 2012, pp. 1–5.

4. 3GPP TR 37.868, 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Study on RAN Improvements for Machine-type Communications; (Release 10) v. 0.6.1 Available at: <https://itectec.com/archive/3gpp-specification-tr-37-868> (Accessed: September 28, 2021).

5. Traffic models for machine type communications / M. Laner, P. Svoboda, N. Nikaein, M. Rupp // The Tenth International Symposium on Wireless Communication Systems, 2013, pp. 1–5.

6. Traffic models for machine-to-machine (M2M) communications: types and applications / M. Laner, P. Svoboda, N. Nikaein, M. Rupp // Machine-to-machine (M2M) Communications, 2015, pp. 133–154.

7. 3GPP TS 38.300, 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; NR; NR and NG-RAN Overall Description; Stage 2 (Release 16) v.16.3.0 Available at: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/138300_138399/138300/15.08.00_60/ts_138300v150800p.pdf (Accessed: September 28, 2021).

8. 3GPP R1-061369, LTE random-access capacity and collision probability Available at: https://www.3gpp.org/ftp/tsg_ran/WG1_RL1/TSGR1_45/Docs/R1-061369.zip (Accessed: September 28, 2021).

Yakov V. Kryukov

Candidate of Engineering, Assistant Professor,
Department of Telecommunications and Basic Principles of Radio Engineering, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 41-33-98
Email: kryukov.tusur@gmail.com

Dmitriy A. Pokamestov

Candidate of Engineering, Assistant Professor,
Department of Telecommunications and Basic Principles of Radio Engineering, TUSUR
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 41-33-98
Email: dmaltomsk@mail.ru

Eugeniy V. Rogozhnikov

Candidate of Engineering, Head of the Department of Telecommunications and Basic Principles of Radio Engineering, TUSUR
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 41-33-98
Email: udzhon@mail.ru

Serafim A. Novichkov

Chief Design Engineer of Leading Research Center «5G Open Radio Access Networks», Skoltech
30, bld. 1, Bolshoy Boulevard, Moscow, Russia, 121205
Phone: +7 (495-2) 80-14-81
Email: S.Novichkov@skoltech.ru

Dmitriy V. Lakontsev

PhD, Assistant Professor, Head of the Center of Excellence NTI «The Wireless Network Technologies and Internet of Things», Skoltech
30, bld. 1, Bolshoy Boulevard, Moscow, Russia, 121205
Phone: +7 (495-2) 80-14-81
Email: d.lakontsev@skoltech.ru