

# Динамическое мультиплексирование URLLC-трафика и eMBB-трафика в восходящем канале при использовании метода неортогонального доступа<sup>1</sup>

И.С. Герасин<sup>\*\*</sup>, А.Н. Красилов<sup>\*,\*\*</sup>, Е.М. Хоров<sup>\*,\*\*</sup>

<sup>\*</sup> *Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва*

<sup>\*\*</sup> *Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН, Москва*

Поступила в редколлегию 01.10.2019 г.

**Аннотация**—В работе рассматривается проблема мультиплексирования в восходящем канале двух различных типов трафика, характерных для сетей 5G: широкополосного трафика (англ.: enhanced Mobile Broadband, eMBB) и трафика сверхнадежной связи с малой задержкой (англ.: Ultra-Reliable Low-Latency Communications, URLLC). Предложена схема динамического мультиплексирования, основанная на использовании метода неортогонального доступа. Построена аналитическая модель, позволяющая оценить производительности сети при использовании предложенной схемы, а также осуществить выбор ее оптимальных параметров с целью максимизации пропускной способности сети для eMBB-трафика при выполнении требований к качеству обслуживания для URLLC-трафика.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** неортогональный доступ, URLLC, eMBB, сети пятого поколения.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

На данный момент ведется активная разработка беспроводных сетей пятого поколения (5G). Ключевым требованием к сетям 5G [1] является предоставление различных сервисов, которые предъявляют разные требования к качеству обслуживания, в том числе: сервиса сверхнадежной связи с малой задержкой (англ.: Ultra-Reliable Low Latency Communications, URLLC) и сервиса широкополосной передачи данных (англ.: enhanced Mobile Broadband, eMBB). Для сервиса eMBB необходимо обеспечить передачу большого объема данных с максимально возможной скоростью. Сервис URLLC, напротив, генерирует небольшие объемы данных, но требует обеспечения низкой задержки передачи пакетов (менее 1 мс) и сверхнадежной доставки пакетов (вероятность потери пакета должна быть меньше  $10^{-5}$ ). Одной из важнейших открытых задач является то, каким образом разделять частотно-временные ресурсы беспроводного канала между указанными типами трафика в случае восходящей передачи (от пользователей к базовой станции).

Так как рассматриваемые типы трафика предъявляют существенно разные требования, то для их обслуживания используются различные методы доступа к каналу. Для eMBB-трафика ресурсы динамически назначаются базовой станцией: с помощью контрольного канала пользователь отправляет запрос на передачу данных, а в ответ базовая станция назначает некоторый частотно-временной ресурс. Динамическое назначение ресурсов с учетом качества канала различных пользователей позволяет повысить спектральную эффективность использования ресурсов канала и, тем самым, пропускную способность сети. В случае URLLC-трафика динамическое назначение ресурсов через отправку запросов оказывается невозможным из-за

<sup>1</sup> Исследование выполнено в МИЭМ НИУ ВШЭ за счет гранта Российского научного фонда (проект №18-19-00580).

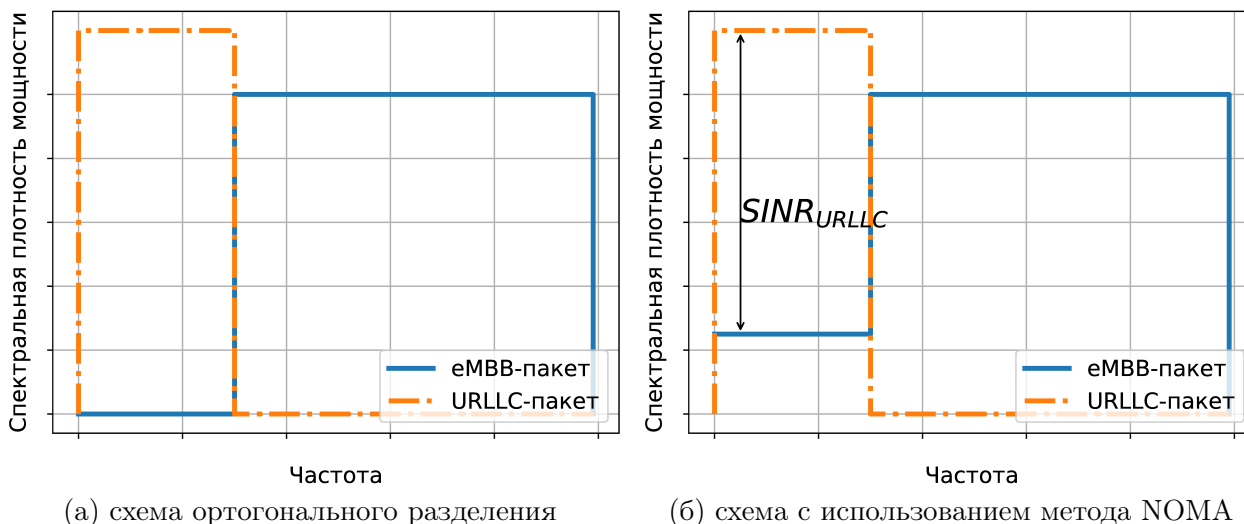


Рис. 1. Различные схемы мультиплексирования URLLC-трафика и eMBB-трафика.

строгих ограничений на время доставки пакета. Для решения данной проблемы в спецификациях 3GPP предложен метод доступа grant-free [2]. Согласно данному методу базовая станция заблаговременно назначает некоторый частотный ресурс, в котором пользователи могут осуществлять передачу URLLC-пакетов на конкурентной основе. Возникает вопрос, каким образом осуществлять разделение доступного частотного канала между URLLC-трафиком и eMBB-трафиком, используя различные методы доступа к каналу.

Одним из возможных решений является схема ортогонального разделения доступного канала (англ.: Orthogonal Multiple Access, OMA) между различными типами трафика (см. рис. 1(а)). Каждому типу трафика выделяются непересекающиеся диапазоны частот (подканалы), которые могут использоваться только для обслуживания данного типа трафика. Однако такое решение приводит к существенному снижению коэффициента использования частотных ресурсов в случае редких URLLC-передач, так как часть канала, предназначенная для данного типа трафика, почти все время будет простаивать.

Другим возможным решением является использование метода неортогонального доступа к каналу (англ.: Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA) [3–5]. Основная идея данного метода заключается в том, что передача URLLC-пакетов и eMBB-пакетов осуществляется в одних и тех же частотно-временных ресурсах, а разделение суммы сигналов на приемнике происходит за счет разности мощностей этих сигналов. В работах [6, 7] исследована схема мультиплексирования на основе метода NOMA, в которой для передачи URLLC-пакетов и eMBB-пакетов используется вся доступная ширина канала. Показано, что в зависимости от канальных условий пользователей рассмотренная схема позволяет повысить пропускную способность сети для eMBB-трафика по сравнению со схемой OMA. В работе [8] изучены вопросы планирования радиоресурсов при использовании метода NOMA в нисходящем канале при передаче данных, чувствительных к задержкам.

В данной работе предлагается более гибкая схема мультиплексирования в восходящем канале на основе метода NOMA (см. рис. 1(б)). Доступный частотный канал делится на два подканала: (а) общий подканал, в котором осуществляется одновременная передача URLLC-пакетов и eMBB-пакетов, (б) eMBB-подканал, используемый для передачи только eMBB-пакетов. В отличие от работ [6, 7], в данной схеме можно динамически изменять ширину общего подканала.

Декодирование данных в общем подканале осуществляется следующим образом. В силу строгих ограничений на время и вероятность доставки, сначала выполняется декодирование

URLLC-пакета. Чтобы обеспечить заданную вероятность декодирования URLLC-пакета, отношение мощностей сигналов от URLLC-пользователя и eMBB-пользователя на приемнике должно быть выше некоторого порога  $SINR_{URLLC}$ , который зависит от выбранной для передачи URLLC-пакета сигнально-кодовой конструкции. После декодирования URLLC-пакета его сигнал вычитается из суммы, и осуществляется декодирование eMBB-пакета.

Для предложенной выше схемы возникает следующая задача: как адаптивно выбирать ширину общего подканала и разделять мощность, доступную eMBB-пользователю(ям), между подканалами, чтобы максимизировать пропускную способность сети для eMBB-трафика и при этом выполнить строгие ограничения на время и вероятность доставки пакетов для URLLC-трафика. Для решения данной задачи в разделе 2 разработана аналитическая модель передачи данных с использованием описанной выше схемы мультиплексирования, которая позволяет оценить пропускную способность канала для URLLC-трафика и eMBB-трафика. С помощью модели проводится оптимизация параметров предложенной схемы мультиплексирования, а также сравнение со схемой ортогонального разделения ресурсов ОМА.

## 2. АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Рассмотрим базовую станцию сети 5G, которая обслуживает двух пользователей, генерирующих различные типы трафика: URLLC и eMBB. Оба пользователя передают на мощности  $P_0$  и находятся на расстоянии  $d_{URLLC}$  и  $d_{eMBB}$  от базовой станции соответственно. Трафик eMBB-пользователя является насыщенным (т.е. у него всегда есть данные на передачу). URLLC-пользователь генерирует одиночные пакеты размера  $s$ , для передачи которых используются короткие временные слоты длительностью  $\tau$ . Мы предполагаем, что интервал между приходом соседних URLLC-пакетов много больше  $\tau$ . Передача осуществляется от пользователей к базовой станции в частотном канале ширины  $B$ .

Обозначим  $\beta$  ( $\beta \in [0, 1]$ ) долю от общей ширины канала, выделенную для общего подканала, в котором осуществляется передача URLLC-пакетов и eMBB-пакетов с использованием метода неортогонального доступа. Тогда  $(1 - \beta)$  – оставшаяся доля канала, предназначенная исключительно для передачи eMBB-пакетов. eMBB-пользователь осуществляет передачу в обоих подканалах: с мощностью  $\alpha P_0$  в общем подканале и  $(1 - \alpha)P_0$  в eMBB-подканале, где  $\alpha$  – параметр ( $\alpha \in [0, 1]$ ). Мощность сигнала, принимаемого базовой станцией, определяется коэффициентом затухания  $PL(d)$ , зависящим от расстояния  $d$  между пользователем и базовой станцией. Тогда  $P_{eMBB} = PL(d_{eMBB})P_0$  и  $P_{URLLC} = PL(d_{URLLC})P_0$  – мощности сигнала, принимаемые базовой станцией, для eMBB-пользователя и URLLC-пользователя соответственно.

Рассмотрим передачу URLLC-пакетов в общем подканале при использовании неортогонального доступа. Полезный сигнал на приемнике имеет мощность  $P_{URLLC}$ . Интерференцией для него является сигнал от eMBB-пользователя с мощностью  $\alpha P_{eMBB}$ . Спектральную плотность мощности теплового шума на приемнике обозначим за  $P_N$ . В данной работе рассматривается случай передачи больших URLLC-пакетов (более 100 байт). Существующие сигнально-кодовые конструкции, разработанные для сетей 5G, при большой длине кодового слова обеспечивают пропускную способность, близкую к границе Шеннона [9, 10]. Тогда пропускную способность общего подканала для URLLC-трафика можно оценить следующим образом:

$$R_{URLLC} = \beta B \log_2 \left( 1 + \frac{P_{URLLC}}{\beta B P_N + \alpha P_{eMBB}} \right). \quad (1)$$

При малой длине URLLC-пакетов для оценки  $R_{URLLC}$  можно воспользоваться границей Полянского для кодов с конечной длиной [11].

Теперь рассмотрим передачу данных от eMBB-пользователя в обоих подканалах. Так как URLLC-пакет должен доставляться с очень высокой вероятностью ( $1 - 10^{-5}$ ), то предполагает-

ся, что он всегда декодируется успешно и сигнал URLLC-пользователя вычитается из принятого сигнала. Тогда для eMBB-пользователя в общем подканале URLLC-пользователь не создает интерференции, а мощность полезного сигнала равняется  $\alpha P_{eMBB}$ . В eMBB-подканале полезный сигнал принимается с мощностью  $(1-\alpha)P_{eMBB}$ . Тогда суммарная пропускная способность обоих подканалов для eMBB-трафика может быть оценена как:

$$R_{eMBB} = \beta B \log_2 \left( 1 + \frac{\alpha P_{eMBB}}{\beta B P_N} \right) + (1 - \beta) B \log_2 \left( 1 + \frac{(1 - \alpha) P_{eMBB}}{(1 - \beta) B P_N} \right). \quad (2)$$

Из уравнений (1) и (2) видно, что при заданных параметрах сети  $P_0$ ,  $B$ ,  $d_{URLLC}$ ,  $d_{eMBB}$  ее производительность зависит от параметров  $\alpha, \beta$ :

$$R_{URLLC} = F_1(\alpha, \beta), \quad R_{eMBB} = F_2(\alpha, \beta). \quad (3)$$

Целью данной работы является нахождение оптимальных значений параметров  $\alpha^*, \beta^*$  таких, чтобы (а) выполнялись требования к качеству обслуживания для URLLC-трафика и при этом (б) достигалась максимально возможная пропускная способность канала для eMBB-трафика. Условие (а) будет выполнено, если пропускной способности общего подканала для URLLC-трафика достаточно, чтобы передать пакет размером  $s$  за время  $\tau$ , т.е. когда:

$$R_{URLLC} = \frac{s}{\tau}. \quad (4)$$

Приравнявая (1) и (4), можно выразить  $\beta$  как неявную функцию  $G(\alpha)$ . Подставив вместо  $\beta$  функцию  $G(\alpha)$  в (2), получаем, что  $R_{eMBB} = F_2(\alpha, G(\alpha))$ . Для выполнения требования (б) необходимо максимизировать  $F_2(\alpha, G(\alpha))$  при условии, что  $0 \leq \alpha \leq 1$  и  $0 \leq G(\alpha) \leq 1$ . Таким образом, можно найти оптимальное значение параметра  $\alpha^*$ , которое максимизирует значение функции  $F_2$  при заданных ограничениях, и  $\beta^* = G(\alpha^*)$ . Подставив найденные значения параметров в (2), можно оценить значение максимально достижимой пропускной способности канала для eMBB-трафика в случае использовании предложенной схемы мультиплексирования.

Для оценки пропускных способностей в том же сценарии, но при использовании схемы ортогонального разделения ресурсов (OMA), достаточно принять  $\alpha = 0$  в (1) и (2). Тогда  $\beta^* = G(0)$  и зависит только от положения URLLC-пользователя, а  $R_{eMBB} = F_2(0, G(0))$ .

### 3. ЧИСЛЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Рассмотрим следующий сценарий для оценки производительности предложенной схемы мультиплексирования. Базовая станция располагается на высоте 30 м. Оба пользователя передают на максимальной мощности  $P_0 = 23$  дБм и располагаются на высоте 1 м. Ширина канала  $B = 20$  МГц. Для вычисления коэффициента  $PL(d)$  используется модель распространения сигнала COST-Nata [12]. Размер URLLC-пакета  $s = \{100, 1000\}$  байт. Длительность передачи URLLC-пакета  $\tau = 143$  мкс (соответствует длительности двух OFDM символов при расстоянии между поднесущими 15 кГц [13]). Коэффициент усиления шума (англ.: Noise Figure [14]) на приемнике 5 дБ. Тогда спектральная мощность теплового шума  $P_N = -174 + 5 = -169$  дБм/Гц.

На рис. 2 представлена зависимость пропускной способности канала для eMBB-трафика в зависимости от  $d_{URLLC}$  при оптимальных параметрах  $\alpha^*$  и  $\beta^*$ , которые изображены на рис. 3 и 4 соответственно. Рассмотрим результат, соответствующий схеме OMA. Рис. 4 показывает, в каких диапазонах возможно выполнение требований для URLLC-пользователя при использовании схемы OMA. В частности, максимальное расстояние, при котором требования к URLLC-трафику удовлетворены, для передачи пакета размером 1000 байт равняется 160 м,

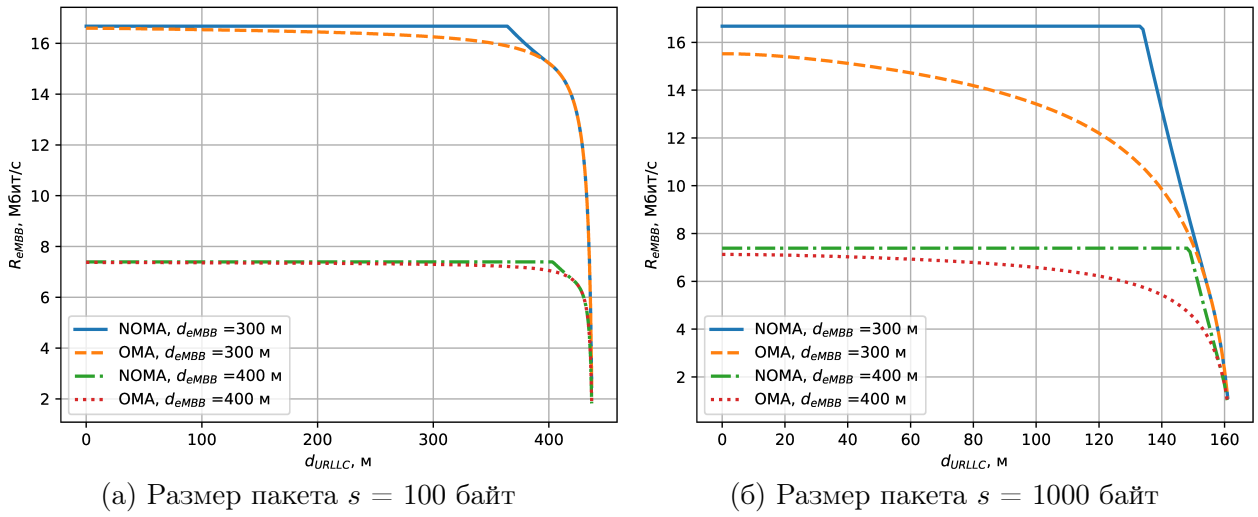


Рис. 2. Пропускные способности канала для eMBB-трафика

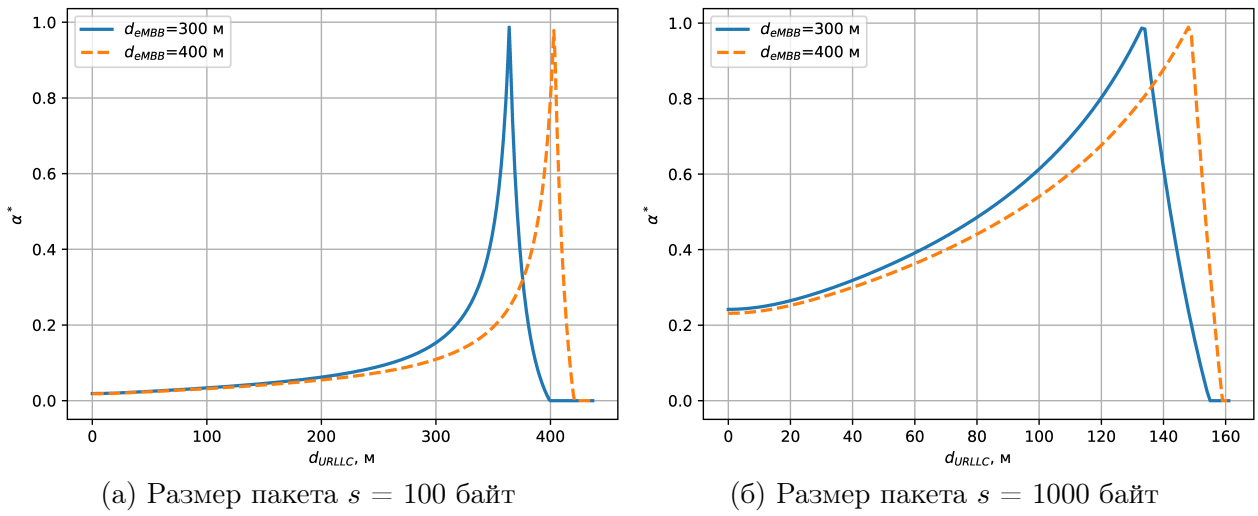


Рис. 3. Оптимальное значение параметра  $\alpha$

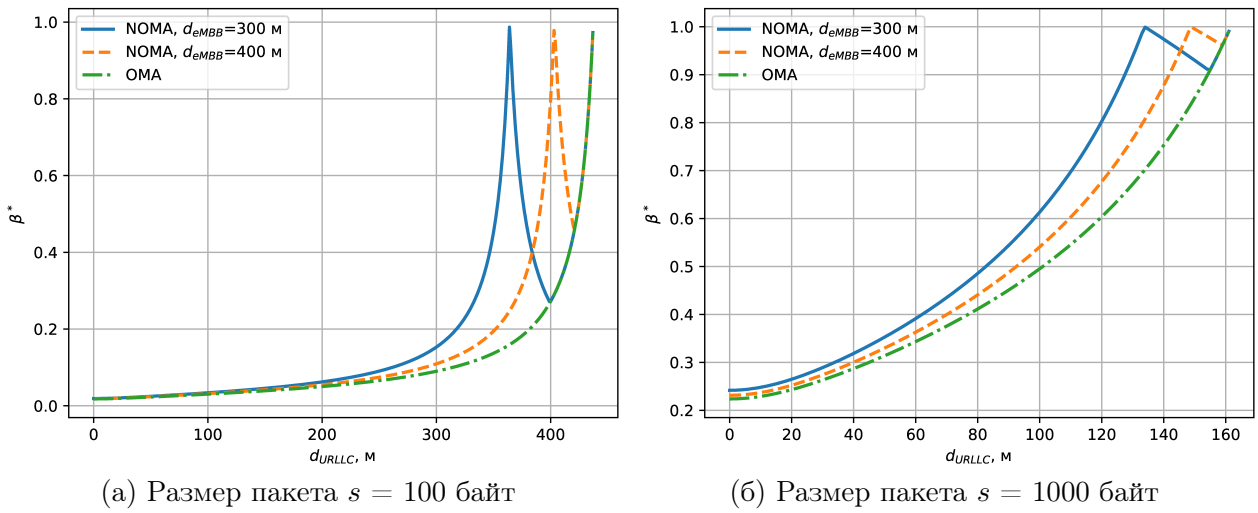


Рис. 4. Оптимальное значение параметра  $\beta$

а для пакета размером 100 байт – 420 м. С увеличением расстояния от базовой станции до URLLC-пользователя доля канала  $\beta$ , необходимая для передачи URLLC-пакета, постепенно увеличивается до 1, снижая пропускную способность канала для eMBB-трафика до нуля (см. рис. 2).

Далее рассмотрим результаты, соответствующие предложенной схеме мультиплексирования с использованием метода NOMA. С увеличением расстояния  $d_{URLLC}$  и, соответственно, уменьшением  $P_{URLLC}$  пропускная способность канала для eMBB-трафика не уменьшается до тех пор, пока  $\beta^* < 1$ . Это происходит из-за того, что значение  $P_{URLLC}$  достаточно велико, что позволяет успешно декодировать URLLC-пакет, и при этом позволяет eMBB-пользователю осуществлять передачу, равномерно распределяя свою мощность по всей доступной ширине канала  $B$  (заметим, что значения  $\alpha^*$  и  $\beta^*$  совпадают в этом диапазоне). После того, как  $\beta^*$  достигает значения 1, начинается уменьшение пропускной способности eMBB-пользователя и значения  $\beta^*$  из-за того, что мощности  $P_{URLLC}$  становится недостаточно для успешной передачи URLLC-пакета и необходимо снизить интерференцию от eMBB-пользователя (т.е. уменьшить значение  $\alpha^*$ ). Далее значение  $\alpha^*$  уменьшается до нуля, когда использование неортогонального доступа не позволяет осуществить передачу URLLC-пакета при наличии интерференции от eMBB-пользователя. В этом случае возможно только использование ортогонального доступа (на рис. 2 и 4 кривые OMA и NOMA совпадают). Так же можно видеть, что использование неортогонального доступа дает ощутимый прирост пропускной способности канала для eMBB-трафика при передаче больших URLLC-пакетов. В частности, при размере пакета 1000 байт и расстояниях  $d_{URLLC} = 130$  м,  $d_{eMBB} = 300$  м прирост пропускной способности для eMBB-трафика по сравнению со схемой OMA достигает 50%. Это происходит из-за того, что при передаче большого URLLC-пакета требуется большая ширина канала (большое значение  $\beta$ ). В случае схемы OMA увеличение  $\beta$  приводит к снижению пропускной способности канала для eMBB-трафика. В то же время, при использовании схемы NOMA пропускная способность при малых  $d_{URLLC}$  (пока  $\beta^* < 1$ ) не уменьшается.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе исследована проблема мультиплексирования в восходящем канале двух различных типов трафика, характерных для сетей 5G: широкополосного трафика (eMBB), для которого требуется обеспечить максимально возможную скорость передачи данных, и трафика сверхнадежной связи с малой задержкой (URLLC), для которого необходимо выполнить строгие ограничения на время и вероятность доставки пакетов. Предложена схема динамического мультиплексирования рассматриваемых типов трафика, основанная на использовании метода неортогонального доступа. Построена аналитическая модель для оценки производительности сети при использовании предложенной схемы мультиплексирования и поиска ее оптимальных параметров.

Численные результаты показывают, что при выборе оптимальных параметров предложенная схема позволяет значительно повысить пропускную способность канала для eMBB-трафика при выполнении требований к качеству обслуживания для URLLC-трафика по сравнению со схемой ортогонального разделения частотных ресурсов. Величина прироста пропускной способности для eMBB-трафика зависит от параметров URLLC-трафика и качества канала пользователей, участвующих в передаче данных. В рассмотренных сценариях величина прироста достигает 50%.

В последующих работах планируется реализовать предложенную схему мультиплексирования в среде имитационного моделирования NS-3 для проведения системного моделирования в сценариях с большим числом пользователей и учетом свойств сигнально-кодовых конструкций, используемых в сетях 5G.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond : Recommendation : M.2083 / ITU-R : 2015. — September.
2. NR; Physical layer procedures for data : Technical Specification (TS) : 38.214 / 3rd Generation Partnership Project (3GPP) ; Executor: 3GPP : 2018. — 01. — Version 15.0.0.
3. Power-domain non-orthogonal multiple access (NOMA) in 5G systems: Potentials and challenges / SM Riazul Islam, Nurilla Avazov, Octavia A Dobre, Kyung-Sup Kwak // IEEE Commun. Surveys Tuts. — 2017. — Secondquarter. — Vol. 19, no. 2. — P. 721–742.
4. Non-Orthogonal Multiple Access: A Unified Perspective / Q. Wang, R. Zhang, L. Yang, L. Hanzo // IEEE Wireless Communications. — 2018. — April. — Vol. 25, no. 2. — P. 10–16.
5. Khorov E., Kureev A., Levitsky I. NOMA Testbed on Wi-Fi // 2018 IEEE 29th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC). — 2018. — Sep. — P. 1153–1154.
6. 5G Wireless Network Slicing for eMBB, URLLC, and mMTC: A Communication-Theoretic View / P. Popovski, K. F. Trillingsgaard, O. Simeone, G. Durisi // IEEE Access. — 2018. — Vol. 6. — P. 55765–55779.
7. Kassab R., Simeone O., Popovski P. Coexistence of URLLC and eMBB Services in the C-RAN Uplink: An Information-Theoretic Study // 2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). — 2018. — Dec. — P. 1–6.
8. Scheduling for Downlink Non-Orthogonal Multiple Access in Wi-Fi Networks / E. Khorov, A. Kureev, I. Levitsky, S. Tutelian // 2018 International Scientific and Technical Conference Modern Computer Network Technologies (MoNeTeC). — 2018. — Oct. — P. 1–6.
9. Gamage H., Rajatheva N., Latva-aho M. Channel coding for enhanced mobile broadband communication in 5G systems // 2017 European Conference on Networks and Communications (EuCNC). — 2017. — June. — P. 1–6.
10. MacKay D. J. C., Neal R. M. Near Shannon limit performance of low density parity check codes // Electronics Letters. — 1997. — March. — Vol. 33, no. 6. — P. 457–458.
11. Polyanskiy Y., Poor H. V., Verdú S. Channel Coding Rate in the Finite Blocklength Regime // IEEE Transactions on Information Theory. — 2010. — May. — Vol. 56, no. 5. — P. 2307–2359.
12. Rappaport Theodore S. Wireless communications: Principles and practice. Prentice Hall communications engineering and emerging technologies series. — 2nd edition. — Prentice Hall, 2002.
13. Gerasin I., Krasilov A. Improving Performance of Web Services in 5G New Radio Systems // 2019 IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom). — 2019. — June. — P. 1–3.
14. Packard Hewlett, Rosa S. Fundamentals of RF and microwave noise figure measurements // Appl. Note. — 1983. — P. 57–1.

## Dynamic Multiplexing of URLLC and eMBB Traffic in Uplink using Non-Orthogonal Multiple Access

**Gerasin I.S., Krasilov A.N., Khorov E.M.**

This paper considers the problem of multiplexing two types of traffic in uplink channel of a 5G network: enhanced Mobile Broadband(eMBB) and Ultra-Reliable Low-Latency Communications(URLLC). We propose a dynamic multiplexing scheme based on non-orthogonal multiple access. We develop an analytical model of this scheme to estimate the network performance and to select the optimal parameters that maximize eMBB throughput while satisfying URLLC quality of service requirements.

**KEYWORDS:** non-orthogonal multiple access, URLLC, eMBB, 5G networks