

## О емкости сети 5G для трафика URLLC <sup>1</sup>

А.Н. Красилов, Е.М. Хоров, М.В. Царицын

*Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН, Москва*

Поступила в редколлегию 05.03.2019 г.

**Аннотация**—Способность обеспечивать сверхнадежную связь с низкой задержкой (URLLC) является одной из ключевых особенностей сетей пятого поколения. Строгие требования к качеству обслуживания, типичные для трафика URLLC, существенно снижают емкость беспроводной сети по сравнению с емкостью для обычного широкополосного трафика. В данной работе с помощью имитационного моделирования исследуется, как емкость сети для трафика URLLC зависит от таких основных параметров сети, как используемая ширина полосы, радиус соты, допустимые для трафика URLLC время доставки и вероятность потери пакета.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** сверхнадежная связь с низкой задержкой, сети пятого поколения, емкость сети.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В ближайшее время ожидается появление сотовых сетей пятого поколения (5G) [1], одной из ключевых особенностей которых является возможность обеспечить сверхнадежную передачу данных с низкой задержкой (англ.: Ultra-Reliable Low Latency Communications, URLLC). Для URLLC характерны строгие ограничения на время доставки пакета  $D^{QoS} = 1$  мс и долю потерянных пакетов  $PLR^{QoS} = 10^{-5}$  [1]. Выполнение данных требований необходимо для автоматизации производства, создания интеллектуальных транспортных систем, поддержки виртуальной/дополненной реальности и Тактильного Интернета [2, 3].

Важным показателем производительности сотовой сети является ее емкость. Для трафика URLLC емкость сети можно определить как максимальный объем трафика, который может быть обслужен в рассматриваемой сети с выполнением определенных выше требований к качеству обслуживания. Ввиду строгих требований к качеству обслуживания емкость сети для трафика URLLC оказывается существенно ниже, чем аналогичный показатель для широкополосного трафика, генерируемого, например, при передаче веб-страниц или видеопотоков.

Целью данной работы является исследование влияния таких основных параметров сети, как используемая ширина полосы, радиус соты, а также допустимые время доставки  $D^{QoS}$  и доля потерянных пакетов  $PLR^{QoS}$ , на емкость беспроводной при обслуживании трафика URLLC.

Дальнейшее изложение работы построено следующим образом. В разделе 2 приводится описание рассматриваемого сценария и формулируется задача исследования. В разделе 3 описываются основные результаты исследования. В разделе 4 приведены основные выводы и направления дальнейших исследований.

<sup>1</sup> Исследование выполнено в ИППИ РАН за счет гранта Правительства Российской Федерации (Договор No 14.W03.31.0019)

## 2. ОПИСАНИЕ СЦЕНАРИЯ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим одиночную базовую станцию сети 5G, которая обслуживает  $N$  пользовательских устройств. Доступный базовой станции частный канал разделён по времени и частоте на ресурсные блоки. При этом в отличие от сетей четвертого поколения, в которых длительность временного слота, используемого для передачи данных, равна 1 мс, в сетях 5G для выполнения строгих ограничений на время доставки данных длительность слота уменьшается до  $\tau = \frac{1}{7}$  мс [2, 3]. Каждый слот базовая станция может использовать до  $W$  ресурсных блоков для передачи данных различным пользователям.  $W$  зависит от ширины частотного канала, выделенной базовой станцией для передачи URLLC-пакетов. В данной работе мы анализируем только передачу данных в нисходящем канале, т.е. от базовой станции к пользователям. Передача данных в восходящем канале может быть проанализирована схожим образом с учётом дополнительных задержек, связанных с передачей запросов полосы от пользователей к базовой станции и разрешений на передачу от базовой станции.

Данные, передаваемые пользователю  $i$  представляют собой пуассоновский поток пакетов с интенсивностью  $\lambda_i$ . Размер пакета  $s_i$  — дискретная случайная величина с плотностью распределения  $p_{s_i}(s_i)$  и средним значением  $\bar{s}_i$ . В данной работе предполагается, что требования к качеству обслуживания для всех URLLC-потоков одинаковы: время доставки пакета не должно превышать  $D^{QoS}$  и доля потерянных пакетов не должна превышать  $PLR^{QoS}$ .

Базовая станция обслуживает пакеты с помощью алгоритма планирования радиоресурсов Earliest Deadline First (EDF) [4, 5], согласно которому первым передаётся пакет с наименьшим оставшимся временем жизни. Если пакет не может быть доставлен до истечения его времени жизни, то он отбрасывается из очереди.

Мы рассматриваем одиночную соту, в которой пользователи равномерно распределены в круге радиуса  $R$  вокруг базовой станции. Для каждого пользователя состояние канала определяется величиной отношения мощности сигнала к шуму и интерференции (SINR), которое меняется со временем вследствие замираний сигнала. Для пользователя  $i = \{1, \dots, N\}$  SINR, измеренная в децибелах (дБ), определяется следующим образом:  $SINR_i(t) = SINR_i + F_i(t)$ , где  $SINR_i$  — величина, зависящая только от расположения пользователя, а  $F_i(t)$  — это компонента, определяющая величину замираний. Более конкретно,  $SINR_i$  зависит только от расстояния  $d_i$  до базовой станции:  $SINR(d_i) = P_{TX} - PL(d_i) - P_N$ , где  $P_{TX}$  и  $P_N$  — мощность передачи базовой станции и мощность теплового шума соответственно, измеренные в дБм;  $PL(d_i)$  — затухание сигнала при распространении, измеренное в дБ. Для оценки  $PL(d_i)$  мы используем известную модель распространения Окумура-Хата [6]. Таким образом, например, при мощности передачи на базовой станции 40 дБм в канале шириной 10 МГц, получим  $SINR(d_i) = 90.9 - 35.2 \log_{10}(d_i)$ , где  $d_i$  измеряется в метрах. Что касается замираний сигнала со временем, то мы предполагаем, что  $F_i(t)$  — это стационарный случайный процесс с функцией плотности распределения  $p_{F_i}(F_i)$ . Замирания  $F_i(t)$  для каждого пользователя генерируются с использованием модифицированной модели Джейка [7, 8].

В зависимости от текущего  $SINR_i(t)$  базовая станция выбирает подходящую сигнально-кодировую конструкцию (СКК)  $m_i(t) = m(SINR_i(t))$ , обеспечивающую заданную вероятность доставки пакета. СКК определяет скорость передачи данных  $r_i(m_i(t))$  для пользователя  $i$ , т.е. число байт, которые могут быть переданы данному пользователю в одном ресурсном блоке. Таким образом, при имеющихся  $p_{F_i}(F_i)$  и  $SINR_i$  мы можем определить плотность распределения  $p_{r_i}(r_i)$  скорости передачи данных для пользователя  $i$ .

Используя определение емкости сети, приведенное в разделе 1, в описанном сценарии необходимо найти такой максимальный объем трафика  $L = \sum_{i=1}^N \lambda_i \bar{s}_i$ , при котором требования к качеству обслуживания ( $D^{QoS}$  и  $PLR^{QoS}$ ) будут выполнены.

### 3. ЧИСЛЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Для исследования влияния параметров сети (таких как ширина полосы передачи, размер соты и т.д.), а также требований к качеству обслуживания для потоков URLLC на ёмкость сети была разработана имитационную модель в среде имитационного моделирования NS-3. С помощью модели мы исследовали производительность сети пятого поколения в сценарии, описанном в разделе 2. Ниже, если не сказано иного, использовались следующие параметры по умолчанию: трафик, генерируемый на каждого пользователя, представляет собой пуассоновский поток интенсивностью  $\lambda = 100$  пакетов/с и фиксированным размером пакета  $s = 32$  байта. Увеличивая число пользователей в сети  $N$ , мы увеличиваем нагрузку на соту  $L = N\lambda s$ , и находим максимальную нагрузку, при которой выполнены требования к качеству обслуживания  $D^{QoS}$  и  $PLR^{QoS}$ . Радиус соты равен 400 м, ширина полосы – 20 МГц, т.е. 100 ресурсных блоков (англ: Resource Blocks, RBs). Требования к качеству обслуживания –  $D^{QoS} = 1$  мс,  $PLR^{QoS} = 10^{-5}$ .

#### 3.1. Влияние размера соты и ширины полосы

Рис. 1 показывает результаты эксперимента, в котором исследовалось влияние ширины полосы передачи и радиуса соты на ёмкость сети. Заметим, что мощность передачи увеличивалась пропорционально ширине полосы, чтобы обеспечить одинаковую спектральной плотности мощности.

Из рис. 1 видно, что для  $R < 100$  м ёмкость соты достигает максимального значения, в то время как для соты радиусом больше некоторого критического  $R \approx 100$  м ёмкость начинает уменьшаться. Причина в том, что на расстояниях, меньших  $R$ , все пользователи имеют высокий SINR, позволяющий использовать самую высокоскоростную СКК (т.е. СКК с самой высокой модуляцией и кодовой скоростью). На больших расстояниях пользователи, расположенные близко к краю соты, вынуждены использовать более робастные СКК, а значит, использовать больше канальных ресурсов для передачи пакетов. Также из рис. 1 можно видеть, что расширение полосы позволяет более эффективно использовать доступные канальные ресурсы. В частности, при  $R = 400$  м, четырехкратное повышение ширины полосы с 10 до 40 МГц увеличивает ёмкость в 8 раз. Аналогичные результаты были получены в [9]. Однако в работе [9] авторы рассматривают лишь случай, в котором все пользователи имеют одинаковые канальные условия: пользователи расположены на одинаковом расстоянии от базовой станции и не учитываются замирания сигнала.

#### 3.2. Влияние требований к качеству обслуживания

Пологая фиксированным размер соты ( $R = 400$  м) и ширину полосы (20 МГц), исследуем влияние требований к качеству обслуживания на ёмкость сети. Рис. 2 показывает, что более строгие QoS-требования ведут к значительному снижению ёмкости сети. Также на рис. 2 обозначена верхняя граница ёмкости сети, соответствующая случаю бесконечного  $D^{QoS}$  и отсутствия отбрасывания пакетов на базовой станции. Можно видеть, что при уменьшении  $D^{QoS} (\leq 5)$  временных слотов ёмкость сети стремительно падает. Это объясняется тем, что имеющихся в течение  $D^{QoS}$  ресурсных блоков не хватает для обслуживания даже одного пакета, предназначенных пользователю на границе соты.

#### 3.3. Минимальная ширина полосы в зависимости от требований к качеству обслуживания

Исследуем влияние ширины полосы на ёмкость сети при различных требованиях к качеству обслуживания. Как и в первом эксперименте, изменяя ширину полосы, будем изменять

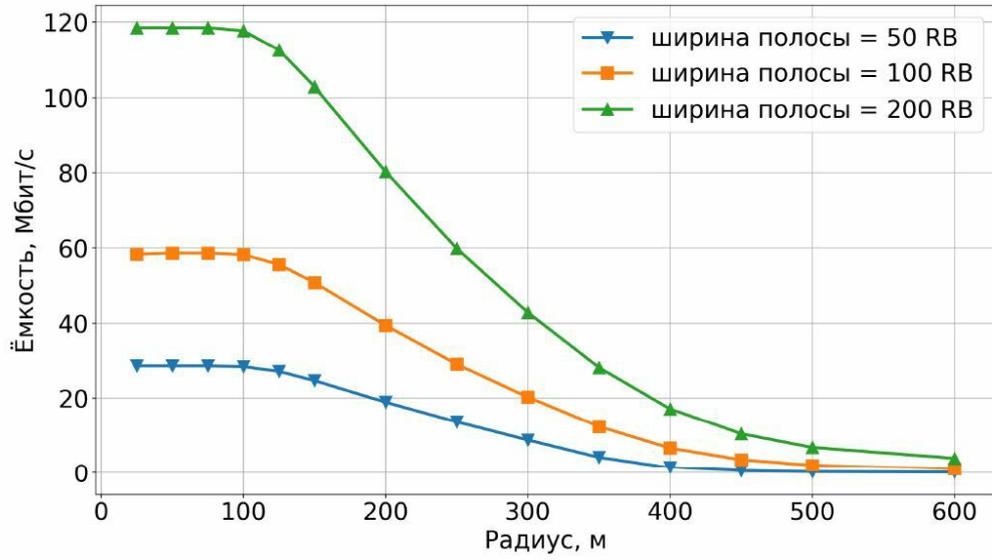


Рис. 1. Влияние радиуса соты на емкость сети

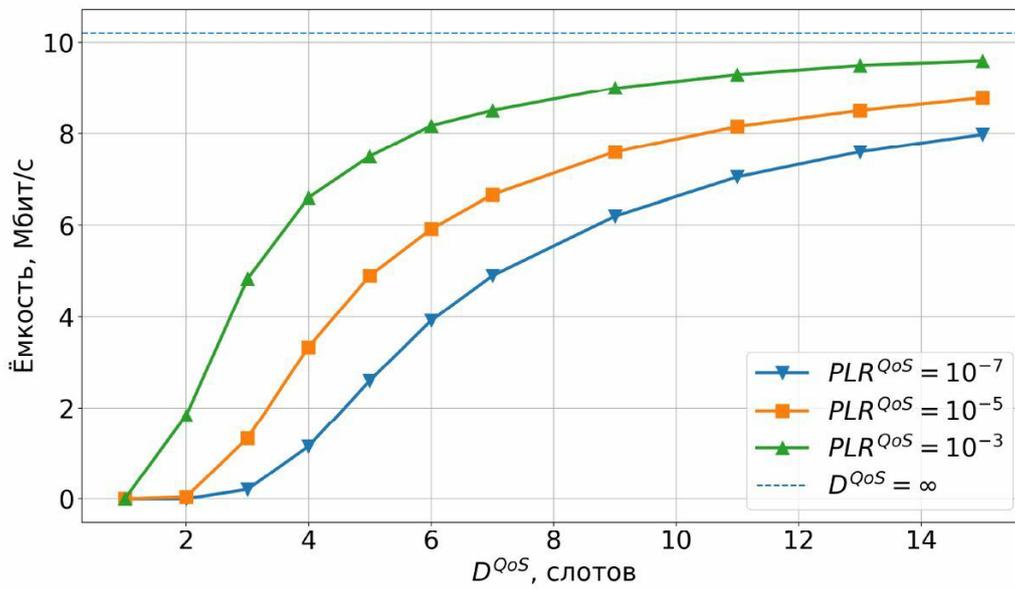


Рис. 2. Влияние требований к качеству обслуживания на емкость сети

пропорционально мощность передачи для сохранения спектральной плотности мощности. Из рис. 3 видно, что при низких задержках передачи данных проявляется сильная нелинейность зависимость ёмкости сети от ширины полосы. Интересно также, что при большой ширине полосы эти зависимости при всех значениях  $D^{QoS}$  вырождаются в линейную. Примечательно, что пороговое значение ширины полосы, при котором происходит «отрыв» графика от нуля различно для разных  $D^{QoS}$ , однако произведение пороговой ширины полосы на допустимое время доставки данных примерно одинаково. Как было отмечено выше, оно определяется объемом частотно-временных ресурсов, необходимым для отправки данных пользователю на границе соты.

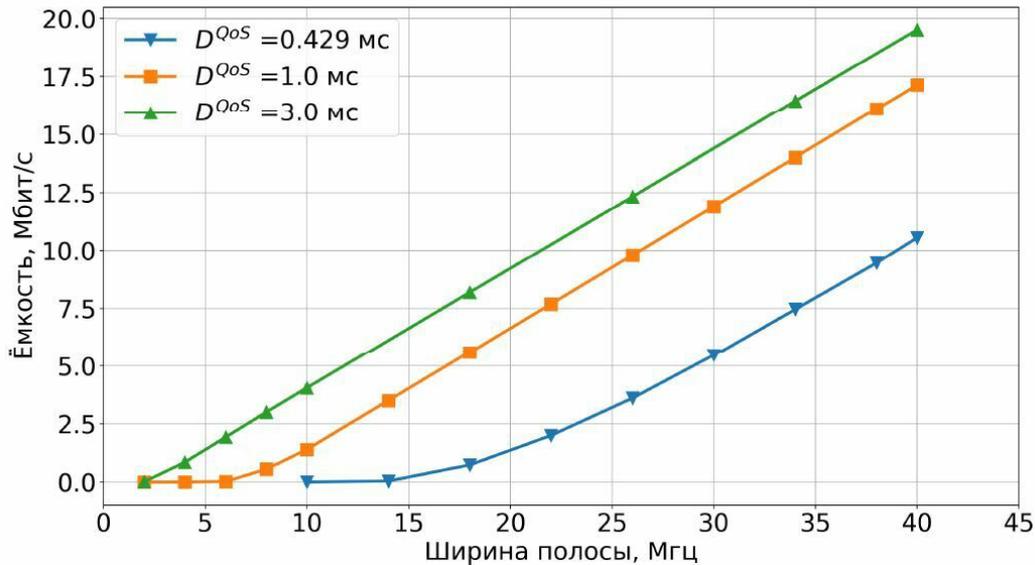


Рис. 3. Влияние ширины полосы передачи на ёмкость сети

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе исследовано, как ёмкость сотовой сети 5G, обслуживающей трафик URLLC, зависит от таких параметров как ширины полосы, размер соты, требования к качеству обслуживания. С помощью имитационного моделирования выявлены следующие особенности.

Во-первых, существует пороговое значение ширины полосы, зависящее от требований к качеству обслуживания  $D^{QoS}$  и  $PLR^{QoS}$ , ниже которого эти требования не могут быть удовлетворены даже для одного пользователя. Указанное значение определяется объемом частотно-временных ресурсов, необходимым для отправки данных пользователю, находящемуся на границе соты. Во-вторых, при ширине полосы много больше этого значения, ёмкость сети растёт почти линейно при увеличении ширины полосы с сохранением спектральной плотности мощности базовой станции. В третьих, ёмкость сети значительно уменьшается только при малых значениях ограничения на время жизни пакета, т.е. когда  $D^{QoS}$  порядка нескольких слотов.

Разработанная модель может быть использована мобильными операторами для конфигурации своих сетей под определённые URLLC-приложения. В частности, оператор может определить минимальную возможную ширину полосы, необходимую для поддержки URLLC-приложений с заданными требованиями к качеству обслуживания и интенсивностью трафика. Или, наоборот, имея фиксированную ширину полосы, оператор может определить максимальную нагрузку на сеть при которой возможно выполнить требования к качеству обслуживания.

Предметом дальнейших исследований является построение аналитических моделей, позволяющих с малой вычислительной сложностью определять указанные выше пороговые значения, а также найденные в данной работе зависимости. Кроме того, планируется исследовать другие алгоритмы планирования радиоресурсов для URLLC-потоков на базовой станции (см., например, [10, 11]) и их влияние на емкость сети.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Framework and Overall Objectives of the Future Development of IMT for 2020 and beyond, *ITU-R, Recommendation M.2083*, September 2015.
2. Service Requirements for Next Generation New Services and Markets, *3GPP Tech. Rep. TS-22.261*, December 2018.
3. Study on New Radio Access Technology: Physical layer aspects, *3GPP Tech. Rep. TR-38.802*, September 2017.
4. L. Georgiadis, R. Guérin, and A. Parekh, Optimal Multiplexing on a Single Link: Delay and Buffer Requirements, *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 43, no. 5, pp. 1518–1535, 1997.
5. A. Dua and N. Bambos, Downlink Wireless Packet Scheduling with Deadlines, *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 6, no. 12, pp.1410–1425, 2007.
6. T. S. Rappaport, *Wireless Communications: Principles and Practice*, 2nd ed., *Prentice Hall*, 2002
7. G. Piro, N. Baldo, and M. Miozzo, An LTE Module for the NS-3 Network Simulator, *4th International ICST Conference on Simulation Tools and Techniques*, [online]: <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=2151054.2151129>
8. P. Dent, G. E. Bottomley, and T. Croft, Jakes Fading Model Revisited, *Electronics Letters*, vol. 29, no. 13, pp. 1162–1163, June 1993.
9. C.-P. Li, J. Jiang, W. Chen, T. Ji, and J. Smees, 5G Ultra-Reliable and Low-Latency Systems Design, *European Conference on Networks and Communications (EuCNC)*, pp. 1–5, 2017.
10. E. Khorov, A. Krasilov, A. Malyshev, Radio Resource Scheduling for Low-Latency Communications in LTE and beyond. Proc. of *IEEE/ACM International Symposium on Quality of Service*, Vilanova i la Geltru, Spain, 2017.
11. E. Khorov, A. Krasilov, A. Malyshev, Radio Resource and Traffic Management for Ultra-Reliable Low Latency Communications // Proc. of *16th IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, Barcelona, Spain, 15-18 April 2018.

## On the Capacity of a 5G Network for URLLC

Krasilov A.N., Khorov E.M., Tsaritsyn M.V.

The ability to support Ultra-Reliable Low Latency Communications (URLLC) is one of the main features of 5G networks. Strict quality of service requirements of URLLC significantly reduces the wireless network capacity for URLLC traffic compared to mobile broadband traffic. In this paper, with simulation we study how URLLC network capacity depends on the main network properties, such as channel bandwidth, cell radius, as well as affordable for URLLC packet delivery time and packet loss ratio.

**KEYWORDS:** ultra-reliable low latency communications, 5G networks, network capacity.