

# Сверхнадежные сети связи с ультра малыми задержками

Д. В. Кашкаров

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций  
им. проф. М.А. Бонч-Бруевича  
dk\_bc@mail.ru

**Аннотация.** В статье рассматриваются сверхнадежные сети связи с ультрамалыми задержками (uRLLC). Анализируются стандарты надежности сетей. Для реализации сверхнадежных соединений был предложен метод использования множественных связей. Численные результаты по потерям пакетов получены в зависимости от количества маршрутов.

**Ключевые слова:** сверхнадежные сети, сети связи с ультра малыми задержками, тактильный интернет, коэффициент готовности

## I. ВВЕДЕНИЕ

Развитие сетей связи общего пользования в последние годы и в обозримой перспективе происходит на основе двух концепций: интернета вещей [1, 2] и тактильного интернета [3, 4]. Если интернет вещей связан, в основном, с числом пользователей сети и порождает сверхплотные сети, то тактильный интернет требует ультра малых задержек и приводит к появлению соответствующих сетей. Сети связи с ультра малыми задержками рассчитаны на предоставление таких услуг, как собственно тактильный интернет, автоматизация производства, дополнительная реальность, беспилотный транспорт с сетевой поддержкой и т. п. [5, 6]. Эти услуги потребовали значительно более высоких показателей надежности, чем это было ранее для существующих сетей связи, в результате чего появилась новая концепция развития сетей связи, а именно: сверхнадежных сетей связи с ультра малыми задержками. В англоязычной литературе для такой технологии построения сетей связи используется аббревиатура uRLLC (ultra Reliable Low Latency Communications) [7, 8].

## II. ПОНЯТИЯ НАДЕЖНОСТИ И ДОСТУПНОСТИ СЕТЕЙ СВЯЗИ

Исследования зарубежных авторов в области надежности сетей связи сосредоточены, в основном, в области двух направлений. Это исследования Reliability и Availability. Первый термин, как видим, используется и в самом названии uRLLC – сетей с ультра малыми задержками [9]. По второму термину статей несколько меньше, но он используется при исследовании доступности или недоступности сети [10].

В соответствии с российскими стандартами [11] под надежностью сети (networkdependability) понимают «Способность выполнять требуемые функции в соответствии с установленными требованиями к коммуникации и эксплуатации сети». При этом следует отметить, что за рубежом в статьях термин networkdependability практически не используется.

Широко используемый термин Reliability в отечественных стандартах, как правило, означает

безотказность [11, 12, 13]: «Способность работать в соответствии с установленными требованиями без отказов в течение заданного периода времени в заданных условиях».

При этом, ГОСТ Р27.002 – 2009 недавно отменен и с 01.01.2022 введены новые ГОСТ Р, в том числе ГОСТ Р 27.018-2021 [11], являющийся аналогом стандарта Международной Электротехнической Комиссии МЭК 62673:2013, и ГОСТ Р 27.102 – 2021 [13].

ГОСТ Р 27.018 – 2021 посвящен проблемам оценки и обеспечения надежности коммуникационной сети, а ГОСТ Р 27.102 – 2021 – терминам и определениям надежности объектов.

При этом, в первом из них отсутствует понятие коэффициента готовности, а во втором коэффициент готовности определяется следующим образом:

(мгновенный) коэффициент готовности: Вероятность того, что в данный момент времени объект находится в работоспособном состоянии, кроме планируемых периодов, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается.

Отметим, что в межгосударственном стандарте ГОСТ 27.002-89 (восстановлен на территории Российской Федерации) [14] коэффициент готовности определен как вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается. Именно на основе этого стандарта коэффициент готовности был нормирован в [15]. При этом наиболее сложное для выполнения значение показателя составляет 0,9999 для местных телефонных сетей связи общего пользования. Для сети передачи данных в [15] использовалось значение 0,99.

Что же касается термина Availability для сети, то в ГОСТ Р по коммуникационным сетям он понимается как готовность сети networkavailability – «Способность быть в состоянии работать в соответствии с установленными требованиями» [11].

Следует отметить, что в понятие Reliability зарубежные исследователи вкладывают де-факто долю потерь пакетов, которая при этом и нормируется. Действительно, сеть не может работать без потерь пакетов, а только невыполнение ей своих функций с заданными требованиями является отказом.

Причем, в этом случае может проявляться некоторое противоречие между численными значениями доступности (availability) и безотказности (reliability). Далее, для оценки параметров надежности для сетей uRLLC в этой работе будем использовать оба термина.

Кроме того, в соответствии с ГОСТ 27.002-89 надежность переводится все-таки и как Reliability, что дает нам право в дальнейшем использовать понятие сверхнадежных сетей с ультра малыми задержками.

### III. ТРЕБОВАНИЯ ПО НАДЕЖНОСТИ И ДОСТУПНОСТИ ДЛЯ ПРИЛОЖЕНИЙ URLLC

В таблице с учетом исследований, проведенных в [9], приведены характеристики задержки и безотказности для различных приложений сверхнадежных сетей с ультра малыми задержками.

ТАБЛИЦА I Показатели надежности и задержки для сетей связи URLLC

Приложение	Круговая задержка	Вероятность безотказной работы (потери) – Reliability
Дискретная автоматика – управление движением	1мс	0,999999
Тактильный Интернет	1мс	0,999999
Дополненная реальность	5мс	0,999999
Распределение энергии – высокое напряжение	5мс	0,999999
Дискретная автоматика	10мс	0,9999
Удаленный контроль	5мс	0,99999

Что касается показателя недоступности unavailability, то в соответствии с [10] его значение не должно превышать 4мс в сутки. В пересчете на коэффициент готовности получаем его значение 0,99999995, что даже еще строже, чем требования по вероятности безотказной работы (потерям).

Как видим, требования по показателям надежности для сетей связи uRLLC существенно более строгие, чем для существующих сетей. Поэтому весьма актуальной является проблема разработки сетевых решений, которые могут обеспечить требуемые показатели.

### IV. МНОЖЕСТВЕННЫЕ СВЯЗИ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ СВЕРХНАДЕЖНЫХ СОЕДИНЕНИЙ В СЕТЯХ 5G И ПОСЛЕДУЮЩИХ ПОКОЛЕНИЙ

В работе [16] предложены модель и метод использования множественных связей для реализации сетей uRLLC. В основе модели и метода лежит гетерогенная структура сетей связи пятого и последующих поколений, что позволяет передавать трафик uRLLC, используя различные технологии, входящие в состав гетерогенных сетей. Модель приведена на рис. 1 из [16].

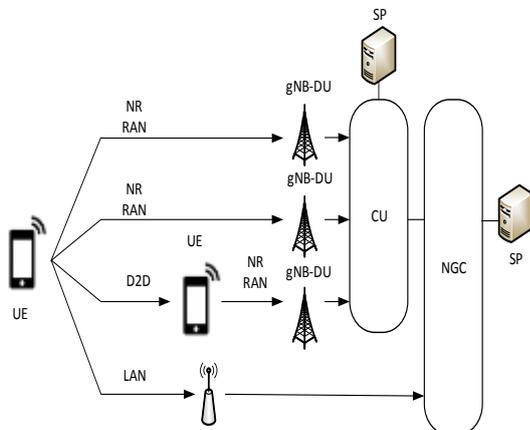


Рис. 1. Модель множественных связей для сети связи пятого поколения

Действительно, для передачи трафика uRLLC можно использовать и взаимодействия устройство-устройство D2D (Device-to-Device), и локальные сети, и различные сети радиодоступа, в том числе и облачные, и т.д. Важно то, что использование множества маршрутов позволяет производить параллельную отправку одного пакета данных через различные элементы сети, что дает возможность уменьшить вероятность потери пакета, поскольку она будет меньше для каждого из используемых маршрутов

$$P_L = \prod_{i=1}^k P_i \quad (1)$$

где  $P_i$  – вероятность потери данных на  $i$ -м маршруте.

Кроме того, за счет того, что в точке предоставления услуги будет использоваться только первый из пришедших пакетов, то задержка будет равна минимальному времени для всех используемых маршрутов.

Естественно, при этом будет увеличиваться нагрузка на сеть. Это приводит к возникновению задачи оптимизации.

На рис. 2 приведена зависимость вероятности потери пакета от числа маршрутов, которое используется для параллельной передачи пакета, при равновероятном распределении трафика между маршрутами.

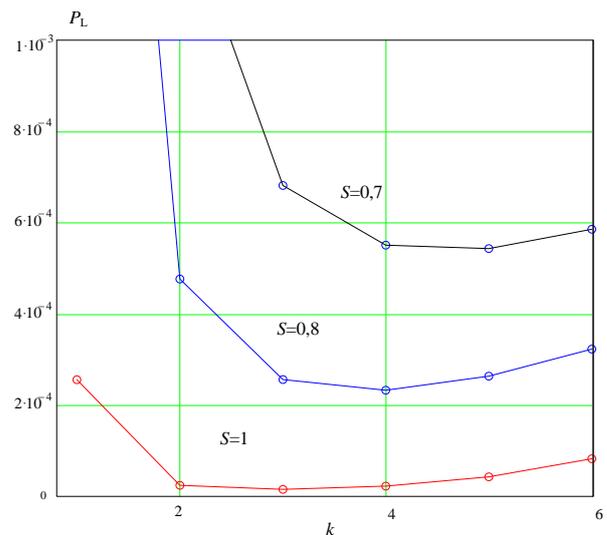


Рис. 2. Зависимость вероятности потерь от числа маршрутов

$S$  на данном рисунке представляет собой величину, которое определяется на основе значений коэффициентов вариации интервалов времени между моментами поступления пакетов и времени обслуживания пакета данных [16].

Очевидно, что увеличение числа маршрутов доставки  $k$  приводит к росту трафика. При увеличении  $k$  до некоторой величины доминирует уменьшение потерь, однако дальнейший рост приводит к доминированию увеличения потерь.

### V. ВЫВОДЫ.

1. Появление сверхнадежных сетей с ультра малыми задержками требует пересмотра норм на показатели надежности сетей связи, в том числе на коэффициент готовности и вероятность безотказной работы.

2. Для реализации требований сверхнадежных сетей с ультра малыми задержками в соответствии с гетерогенной природой сетей связи пятого и последующих поколений может быть использован метод множественных связей.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Кучерявый А.Е. Интернет Вещей // Электросвязь, №1, 2013, с. 21-24.
- [2] Кучерявый А.Е., Прокопьев А.В., Кучерявый Е.А. Самоорганизующиеся сети. СПб.: «Любавич», 2011.
- [3] Кучерявый, А.Е. Тактильный Интернет. Сети связи со сверхмалыми задержками / А.Е. Кучерявый, М.А. Маколкина, Р.В. Киричек // Электросвязь. 2016. № 1. С. 44-46.
- [4] Кучерявый А.Е., Выборнова А.И. Тактильный Интернет // Сборник научных статей V международной научно-технической и научно-методической конференции «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании» АПИНО-2016. Том 1. С. 6-11.
- [5] Кучерявый А.Е. Сети связи с ультра малыми задержками // Труды НИИР, 2020.
- [6] Yastrebova A., Kirichek R., Koucheryavy Y., Borodin A., Koucheryavy A. Future Networks 2030: Architecture and Requirements // The 10th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems (ICUMT), November 2018, Moscow. Proceedings, 2018.
- [7] Popovski and P. Wireless Access for Ultra-Reliable Low Latency Communications. // IEEE Network, v.32, issue 2. March-April 2018, pp. 16-23.
- [8] Кучерявый А.Е. Сети связи 2030 / А.Е. Кучерявый, А.С. Борodin, Р.В. Киричек // Электросвязь. 2018. №11. С. 52-56.
- [9] Z.Li, M.Uusitalo, H.Shariatmadari, B.Singh. 5G URLLC: Design Challenges and System Concepts. 15th International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS), October 8-9. Tokio, Japan, 2018, 6 p.
- [10] Zhani, Mohamed Faten & Elbakoury, Hesham. (2020). FlexNGIA: A Flexible Internet Architecture for the Next-Generation Tactile Internet. Journal of Network and Systems Management. 28. 10.1007/s10922-020-09525-0.
- [11] ГОСТ Р 27.018 – 2021 (МЭК 62673:2013). Надежность в технике. Методы оценки и обеспечения надежности коммуникационной сети.
- [12] ГОСТ Р 27.002 – 2009. Надежность в технике. Термины и определения.
- [13] ГОСТ Р 27.102 – 2021. Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения.
- [14] ГОСТ 27.002 – 89. Межгосударственный стандарт. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения.
- [15] ГОСТ Р 5311 – 2008. Устойчивость функционирования сети связи общего пользования. Требования и методы проверки.
- [16] Кашкаров Д.В. Модель и метод использования множественных связей для реализации сверхнадежных соединений в сети 5G / Кашкаров Д.В., Парамонов А.И., Кучерявый А.Е. // Электросвязь. 2021. № 8. С. 16-22.