

Анализ показателей эффективности совместного обслуживания трафика URLLC и eMBB в сети 5G в виде ресурсной системы массового обслуживания

П. В. Азарцова*, В. А. Селезнев*, А. С. Агеева*,
А. И. Куцазли*, П. А. Харин*

** Российский университет дружбы народов,
117198, Москва, ул. Миклуто-Маклая, д. 6*

Email: 1032182530@rudn.ru, 1032186066@rudn.ru, 1032212304@rudn.ru, kushchazli-ai@rudn.ru,
pxarin@mail.ru

В беспроводных сетях 5G выделяют три основных сценария реализации: сверхнадежная передача данных с малой задержкой URLLC (Ultra-reliable and low-latency communication), расширенная мобильная широкополосная связь eMBB (Enhanced Mobile Broadband) и массовая межмашинная связь mMTC (Massive Machine-Type Communications). В работе рассматривается модель совместного обслуживания приоритетного URLLC трафика, поддерживающего очень низкие задержки (< 1 мс) и высокую надежность передачи данных, и eMBB трафика, нацеленного на обслуживание на высоких скоростях. Проведен анализ модели, в которой ресурс задается такими параметрами, как полоса пропускания частот, временная единица и мощность передаваемого сигнала. Политика занятия ресурса основана на его разделении по частоте и по времени, а также на равномерном распределении слота времени между устройствами. Приведены результаты численного анализа показателей эффективности модели.

Ключевые слова: 5G, сверхнадежная передача с малой задержкой URLLC, широкополосная связь eMBB, прерывание обслуживания, ресурсная система массового обслуживания.

1. Введение

Современные развивающиеся беспроводные сети пятого поколения (5G) поддерживают всё большее количество различных услуг и приложений [1]. Рассматриваются три основных сценария реализации, помогающих поддерживать возникающие требования: сверхнадежная передача данных с малой задержкой URLLC, расширенная мобильная широкополосная связь eMBB и массовая межмашинная связь mMTC [2]. В данной работе представлена математическая модель совместного обслуживания приоритетного узкополосного URLLC и широкополосного eMBB трафика в виде ресурсной системы массового обслуживания, которая была рассмотрена ранее [3]. В работах [4] и [5] рассматривались модели без учёта расстояния.

2. Схема приоритетного обслуживания

Для рассматриваемой модели совместного обслуживания приоритетного URLLC и eMBB трафика предполагается, что входящие потоки запросов обоих типов трафика пуассоновские, а их интенсивности равны λ_u , что соответствует URLLC, и λ_m , что соответствует eMBB трафику. Время обслуживания сессий узкополосного и широкополосного трафика распределено экспоненциально с параметрами μ_u и μ_m . Емкость системы представлена в виде ресурсных блоков PRB (Physical Resource Block), причем сессия eMBB занимает один блок, состоящий из b ресурсных единиц, а сессия URLLC – одну ресурсную единицу. Максимальная ёмкость системы равна N PRB-блокам или $C = bN$ ресурсным единицам.

Реализация приоритета сессий URLLC происходит посредством прерывания и блокировки сессий eMBB. При получении запроса на обслуживание широкополосного трафика возможны несколько вариантов отклика системы:

1. При наличии свободного ресурсного блока в системе запрос на обслуживание сессии eMBB трафика будет принят.
2. При отсутствии свободного ресурса запрос на обслуживание eMBB трафика будет заблокирован.

В случае получения запроса на обслуживание узкополосного трафика, являющегося приоритетным, возможны следующие варианты отклика системы:

1. При наличии свободной ресурсной единицы в системе запрос на обслуживание сессии URLLC трафика будет принят.
2. При отсутствии свободной ресурсной единицы и наличии как минимум одной активной сессии eMBB трафика будет прервана случайная сессия широкополосного трафика и принят запрос на обслуживание сессии URLLC трафика за счет освободившегося ресурса.
3. При отсутствии свободного ресурса и активных сессий eMBB трафика запрос узкополосного трафика будет заблокирован.

3. Модель ресурса

Рассмотрена модель совместного обслуживания URLLC и eMBB трафика в виде ресурсной системы массового обслуживания. Устройства равномерно распределяются в области соты беспроводной передачи данных с радиусом равным R , таким что $0 < d < R$, где d — расстояние от пользователя до базовой станции. Предполагается, что ресурс системы имеет трехмерную структуру и задается в виде: $Y = [0, \hat{F}] \times [0, \hat{T} = 1] \times [0, \hat{P}]$, где \hat{F} полоса пропускания частот; \hat{T} слот времени, нормированный к 1, т. е. $\hat{T} = 1$; \hat{P} максимально возможная мощность передаваемого сигнала. Скорость передачи данных b зависит от каждого из трех измерений ресурса и может быть описана формулой Шеннона с учетом затухания сигнала $F_{PL}(x) = \left(\frac{x}{A}\right)^{-2B}$.

Требования к ресурсу для передачи потокового трафика представлены в виде вектора $y = (y_f, y_t, y_p)$. Рассмотрим сценарий для планирования распределения ресурсов Round Robin (RR). При условии n сессий потокового трафика по схеме RR частота постоянна и максимальна $y_f = \text{const} = \hat{F}$, временной слот делится поровну между всеми устройствами $y_t = 1/n$, а мощность регулируется $y_p = y_p^i, i = 1, \dots, n$.

Вероятность приема новой сессии при условии существования n сессий на обслуживании может быть вычислена по формулам [3]:

$$p_0 = 1 - \frac{\left(N_0 \left[2^{b/\hat{F}} - 1\right] \hat{F}\right)^{-2b}}{(AR)^2};$$

$$p_n = \frac{\left\{1 - N_0 \left[2^{b(n+1)/\hat{F}} - 1\right] \hat{F}^{-1}/(AR)\right\}^{2(n+1)}}{\left\{1 - N_0 \left[2^{bn/\hat{F}} - 1\right] \hat{F}^{-1}/(AR)\right\}^{2n}}, n > 0.$$

4. Показатели эффективности

Для описания системы введем случайный процесс $X(t)$ с состояниями (n_m, n_u) , где n_m число активных сессий широкополосного eMBB трафика, n_u число активных сессий URLLC трафика. Пространство состояний принимает следующий вид:

$$X = \{(n_m, n_u) : n_m \geq 0, n_u \geq 0, bn_m + n_u \leq C\}.$$

Рассмотрены следующие показатели эффективности системы:

- Среднее число активных сессий eMBB трафика

$$\bar{n}_m = \sum_{n_m=1}^N n_m \sum_{n_u=0}^{C-bn_m} \pi(n_m, n_u).$$

- Среднее число активных сессий URLLC трафика

$$\bar{n}_u = \sum_{n_u=1}^C n_u \sum_{n_m=0}^{[(C-n_u)/b]} \pi(n_m, n_u).$$

- Вероятность блокировки eMBB трафика

$$B_m = \sum_{n_u=0}^C \pi\left(\left\lfloor \frac{C-n_u}{b} \right\rfloor, n_u\right).$$

- Вероятность блокировки URLLC трафика

$$B_u = \pi(0, C).$$

- Вероятность прерывания обслуживания eMBB трафика

$$I = \sum_{n_m=1}^{N-1} \pi(n_m, C-bn_m) \frac{p_u(n_m+n_u)\lambda_u}{p_u(n_m+n_u)\lambda_u + n_m\mu_m + n_u\mu_u} \frac{1}{n_m} +$$

$$+ \pi(N, C-bN) \frac{p_u(n_m+n_u)\lambda_u}{p_u(n_m+n_u)\lambda_u + n_m\mu_m} \frac{1}{n_m}.$$

5. Численный анализ

Численный анализ модели проведён по двум сценариям (Таблица 1) для перечисленных выше показателей эффективности. Предполагается, что количество ресурсных блоков в системе $N = 6$, каждый из которых состоит из $b = 3$ ресурсных единиц. Интенсивность обслуживания eMBB сессии $\mu_m = 1$, а URLLC $\mu_u = 3$. Радиус области обслуживания $R = 1000$, полоса пропускания частот $\hat{F} = 1.4$, коэффициент мощности шума $N_0 = 0.001$.

На графиках 1 и 2 показана зависимость среднего количества сессий eMBB от изменения интенсивностей поступления как сессий eMBB, так и URLLC. При увеличении интенсивности поступления URLLC сессий среднее количество активных eMBB сессий уменьшается ввиду приоритета URLLC.

На графиках, представленных на рисунках 3 и 4, можно наблюдать изменение вероятности блокировки поступающих eMBB сессий в зависимости от интенсивностей поступления (в первом сценарии - eMBB сессий, а во втором - URLLC сессий). Во втором сценарии кратковременное понижение вероятности блокировки объясняется тем, что заявки URLLC сессий, попавшие на обслуживание вместо некоторых eMBB сессий, имеют более высокую интенсивность обслуживания и, соответственно, быстрее освобождают новый ресурс для eMBB заявок. Но данное понижение вероятности блокировки eMBB временно, так как при дальнейшем увеличении интенсивности поступления URLLC сессий они занимают всё большую часть ресурса ввиду своего приоритета, в конечном счете заполняя весь объем ресурса URLLC сессиями.

График 5 демонстрирует, что с возрастанием интенсивности поступления URLLC заявок возрастает и вероятность их блокировки, причем возрастать начинает с того момента, когда весь ресурс занят URLLC сессиями, то есть все активные eMBB

Таблица 1

Исходные данные

Параметры	Сценарий 1	Сценарий 2
λ_u	[5, 20, 100]	0.1 — 100
λ_m	0.1 — 100	[5, 20, 100]
μ_u	3	3
μ_m	1	1
N	6	6
b	3	3
N_0	0.001	0.001
R	1000	1000
\hat{F}	1.4	1.4

сессии уже прерваны и освобождение ресурса происходит только после завершения URLLC сессий. График 6 демонстрирует, что при увеличении интенсивности поступления URLLC сессий вероятность прерывания активных сессий eMBB трафика сразу возрастает, но далее идет на спад. Сначала поступающие URLLC заявки ввиду своего приоритета вытесняют активные eMBB заявки, но постепенно с дальнейшим увеличением интенсивности поступления весь ресурс расходуется на URLLC сессии, а все активные eMBB сессии оказываются прерваны, что и отображается спадом на графике.

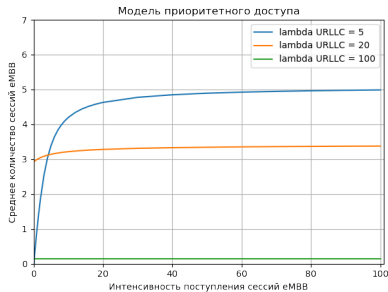


Рис. 1. Среднее число eMBB сессий vs интенсивность поступления eMBB сессий

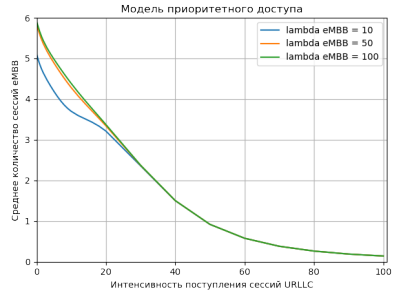


Рис. 2. Среднее число eMBB сессий vs интенсивность поступления URLLC сессий

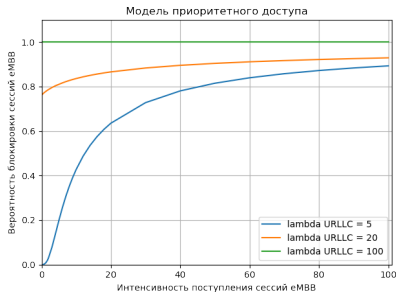


Рис. 3. Вероятность блокировки eMBB сессий vs интенсивность поступления eMBB сессий

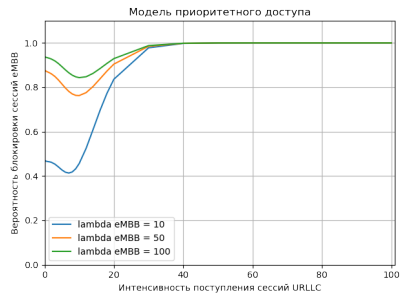


Рис. 4. Вероятность блокировки eMBB сессий vs интенсивность поступления URLLC сессий

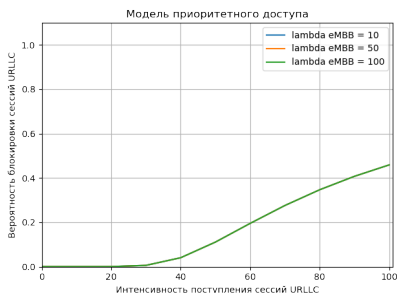


Рис. 5. Вероятность блокировки URLLC сессий vs интенсивность поступления URLLC сессий

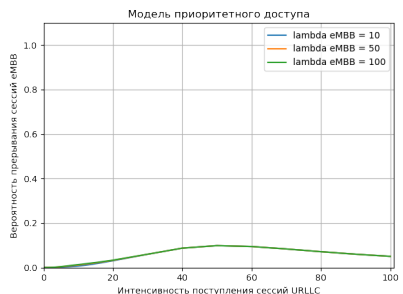


Рис. 6. Вероятность eMBB сессии vs интенсивность поступления URLLC сессий

6. Заключение

В данной работе рассмотрена модель совместного обслуживания приоритетного URLLC и широкополосного eMBB трафика. Представлено описание системной модели, приведены формулы для показателей эффективности. Проведён численный анализ и представлены результаты в виде графиков.

Литература

1. Yin H., Zhang L., Roy S. Multiplexing URLLC traffic within eMBB services in 5G NR: Fair scheduling // IEEE T. Commun., 2021. Vol. 69. Iss. 2. P. 1080–1093. doi: 10.1109/TCOMM.2020.3035582.
2. Alsenwi M., Tran N. H., Bennis M., Pandey S. R., Baira- gi A. K., Hong C. S. Intelligent resource slicing for eMBB and URLLC coexistence in 5G and beyond: A deep reinforcement learning based approach // IEEE T. Wirel. Commun., 2021. Vol. 20. Iss. 7. P. 4585–4600. doi: 10.1109/TWC.2021.3060514.
3. И. А. Кочеткова, А. И. Кушазли, П. А. Харин, С. Я. Шоргин. Модель схемы приоритетного доступа трафика URLLC и eMBB в сети пятого поколения в виде ресурсной системы массового обслуживания. // Информатика и её применения, 2021. Т. 15. Вып. 4. С. 87-92 doi: 10.14357/1992264210412
4. Kushchazli A., Ageeva A., Kochetkova I., Kharin P., Chursin A., Shorgin S. Model of radio admission control for URLLC and adaptive bit rate eMBB in 5G network // CEUR Workshop Procee., 2021. Vol. 2946. P. 74–84.
5. Кочеткова И.А., Кушазли А.И., Харин П.А., Шоргин С. Я. Модель для анализа приоритетного доступа трафика URLLC при прерывании обслуживания и снижении скорости передачи сессий eMBB в сети 5G // Системы и средства информатики, 2021. Т. 31. No 3. С. 123–134.

UDC 621.39

Performance Analysis of Joint URLLC and eMBB Transmission in 5G Network by A Resource Queuing System

Polina Azartsova*, Vasilii Seleznev*, Anastasiya Ageeva*,
Anna Kushchazli*, Petr Kharin*

** Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University),
6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation*

Email: 1032182530@rudn.ru, 1032186066@rudn.ru, 1032212304@rudn.ru, kushchazli-ai@rudn.ru, pxarin@mail.ru

There are three main implementation scenarios in 5G wireless networks: Ultra-reliable and low-latency communication (URLLC), Enhanced Mobile Broadband (eMBB), and Massive Machine-Type Communications (mMTC). This paper considers a model of co-servicing priority URLLC traffic, which supports very low latency (< 1 ms) and high reliability data transmission, and eMBB traffic aimed at delivering higher speeds. We analyse a model in which the resource is specified by parameters such as bandwidth, time unit, and transmitted signal power. The resource occupation policy is based on its frequency and time division, and on the uniform distribution of time slot between the devices. The results of a numerical analysis of the efficiency indicators of the model are presented.

Key words and phrases: 5G, URLLC, eMBB, service interruption, resource queuing system.