

УДК 621.3

DOI: 10.17223/19988605/52/4

Е.Д. Макеева, Н.А. Поляков, П.А. Харин, И.А. Гудкова

ВЕРОЯТНОСТНАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ АНАЛИЗА ХАРАКТЕРИСТИК СОВМЕСТНОЙ ПЕРЕДАЧИ ТРАФИКА URLLC И eMBB В БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЯХ*Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (проект № 2.882.2017/4.6).*

Рассмотрены два варианта построения модели совместного использования расширенной мобильной широкополосной связи eMBB и сверхнадежной связи с низкой задержкой URLLC. В случае отсутствия свободных ресурсов блока PRB для первого варианта является возможным прерывание уже обслуживающихся сессий eMBB-устройств, тем самым приняв новую сессию URLLC-устройства к обслуживанию, а для второго случая вместо блокировки является возможным снижение скорости передачи данных сессии eMBB-устройства. Рассматривается СМО в виде мультисервисной модели Эрланга с разными политиками распределения пропускной способности, выведены показатели эффективности данной модели, проведен численный анализ, на основе которого определяется наиболее эффективная политика распределения ресурсов при совместном планировании передачи данных сессий eMBB и URLLC-устройств.

Ключевые слова: eMBB; URLLC; совместное использование; множественный доступ; системы массового обслуживания (СМО).

Технология 5G предназначена для решения таких проблем, как рост мобильного трафика, увеличение количества устройств, подключенных к сети, сокращение задержек при внедрении новых услуг. Основными услугами в будущих сетях 5G являются расширенная мобильная широкополосная связь (eMBB), массивные коммуникации машинного типа (mMTC) и сверхнадежная связь с низкой задержкой (URLLC). В статьях [1–4] отмечается, что в современных системах 5G предполагается поддержка как мобильного широкополосного трафика (eMBB), так и сверхнадежного трафика с низкой задержкой (URLLC). Таким образом, совместное обслуживание URLLC и eMBB привлекает все большее внимание исследователей. Первая группа исследований связана с нарезкой сети (network slicing). Авторы статьи [5] предлагают распределять ресурсы для URLLC-трафика, ставя в приоритет надежность URLLC. В [6, 7] предложена возможная архитектура совместной передачи URLLC и eMBB-трафика. В [8, 9] рассмотрены основные сценарии реализации обслуживания трафика URLLC и eMBB, технические требования, а также особенности неортогонального совместного использования ресурсов при условии нахождения в сети устройств eMBB, mMTC и URLLC. В [10, 11] приведено исследование эффективности различных вариантов модуляции для мультиплексирования с ортогональным частотным разделением (OFDM) с точки зрения их спектральной эффективности, надежности и т.д. В работах [12, 13] рассмотрены варианты неортогонального использования ресурсов для передачи URLLC и eMBB.

В статье построена математическая модель в виде мультисервисной модели Эрланга для совместной передачи URLLC и eMBB-трафика. Задачами исследования являлись разработка различных политик распределения ресурсов физического канала для рассматриваемой модели, вывод вероятностно-временных характеристик и проведение на их основе численного анализа для определения наиболее эффективной политики распределения ресурсов физического канала.

1. Математическая модель

В этом разделе мы формулируем модель совместной передачи трафика eMBB и URLLC, которая позволяет рассмотреть два возможных варианта планирования распределения ресурсов, суть ко-

торых заключается в следующем: для одной базовой станции, с которой устройства с двумя типами трафика пытаются установить соединение для передачи данных.

Рассмотрим две системы (табл. 1), каждая из которых состоит из ресурсных блоков N , состоящих из b единичных ресурсов. Кроме того, в каждом блоке выделяется d ($d < b$) ресурсных единиц для одновременной передачи сеансов d URLLC с одним текущим сеансом eMBB. Сессии двух типов прибывают в соответствии с пуассоновским потоком интенсивности λ_m и λ_u соответственно. Предположим, что каждый сеанс трафика URLLC занимает 1 единичный ресурс, каждый сеанс eMBB – b ресурсных единиц, т.е. 1 ресурсный блок. Следовательно, максимальное количество сеансов eMBB в системе равно N , сеансов URLLC – $C = N \cdot b$, а максимальное количество активных сеансов URLLC в одном слоте с текущим активным сеансом eMBB – d .

Таблица 1

Системные параметры

Параметры	Описание
λ_m	Интенсивность поступления заявок eMBB
λ_u	Интенсивность поступления заявок URLLC
μ_u^{-1} / μ_m^{-1}	Средняя длительность сессии URLLC / eMBB
n	Количество установленных (активных) сессий
N	Общее количество слотов
b	Количество мини-слотов в одном слоте
$C = N \cdot b$	Общее количество мини-слотов
d	Максимальное количество активных сессий URLLC в одном слоте с текущей активной сессией eMBB

Предполагается, что средняя продолжительность сеансов URLLC / eMBB распределена экспоненциально: μ_u^{-1} и μ_m^{-1} соответственно, $\mu_u^{-1} \ll \mu_m^{-1}$. Обозначим нагрузки: $\rho_m = \frac{\lambda_m}{\mu_m}$ и $\rho_u = \frac{\lambda_u}{\mu_u}$.

2. Модель с прерыванием обслуживания сессий eMBB

Опишем процесс обслуживания приложений для трафика eMBB и URLLC следующим образом: C – максимальная скорость передачи, пространство состояний имеет вид:

$$N = \{(n_m, n_u) : n_m \geq 0, n_u \geq 0, bn_m + n_u \leq C\}, \quad (1)$$

где n_m – количество сеансов eMBB в системе, n_u – количество сеансов URLLC в системе. Схема модели показана на рис. 1.

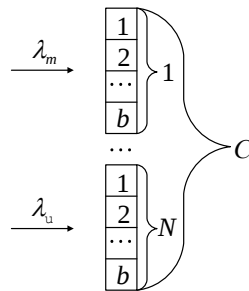


Рис. 1. Схема модели

Fig. 1. Scheme of the model

При поступлении eMBB-сессии на обслуживание возможно следующее развитие событий:

- Если в системе имеется хотя бы один свободный ресурсный блок (b ресурсных единиц в ресурсном блоке), то новая сессия eMBB принимается к обслуживанию.
- Если в системе нет свободного ресурсного блока, то новая сессия eMBB блокируется.

При поступлении URLLC-сессии на обслуживание возможны следующие ситуации:

– Если в системе имеется хотя бы одна свободная ресурсная единица, то новая сессия URLLC принимается к обслуживанию.

– Если в системе нет свободной ресурсной единицы и в системе обслуживается как минимум одна eMBB-сессия, то eMBB сессия прерывается (блокируется) и URLLC сессия поступает на обслуживание.

– Если в системе нет свободной ресурсной единицы и в системе не обслуживаются eMBB-сессии, то новая URLLC сессия блокируется.

Таким образом, возможные переходы для произвольного состояния $(n_m, n_u) \in N$ выглядят следующим образом:

$$\begin{cases} a(n_m, n_u)(n_m + 1, n_u) = \lambda_m, \\ a(n_m, n_u)(n_m, n_u + 1) = \lambda_u, \\ a(n_m, n_u)(n_m - 1, n_u + 1) = \lambda_u, \\ a(n_m, n_u)(n_m - 1, n_u) = n_m \mu_m, \\ a(n_m, n_u)(n_m + 1, n_u) = n_u \mu_u. \end{cases} \quad (2)$$

Общая структура диаграммы перехода между состояниями показана на рис. 2, а также для примера $C = 12, b = 3, N = 4$ – на рис. 3.

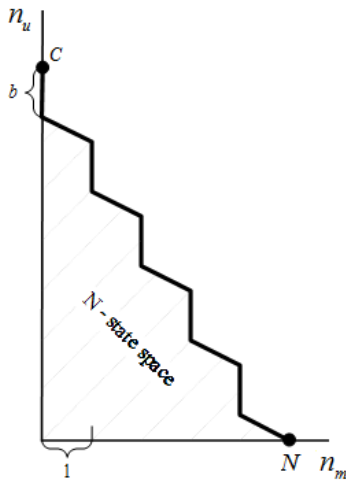


Рис. 2. Диаграмма переходов между состояниями в целом

Fig. 2. State transition diagram in general

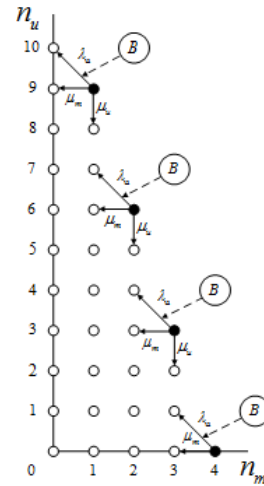


Рис. 3. Диаграмма переходов между состояниями в общем виде для примера $C = 12, b = 3, N = 4$

Fig. 3. State transition diagram in general for example $C = 12, b = 3, N = 4$

Система уравнений глобального баланса для данной системы имеет вид:

$$\begin{aligned} & p(n_m, n_u) [\lambda_m I(bn_m + n_u + b \leq C) + \lambda_u I(bn_m + n_u + 1 \leq C) + \\ & + I(bn_m + n_u + 1 > C, n_m > 0)] + n_u \mu_u I(n_u > 0) + \\ & + n_m \mu_m I(n_m > 0) = p(n_m + 1, n_u) (n_m + 1) \mu_m I(bn_m + n_u + b \leq C) + \\ & + p(n_m, n_u + 1) (n_u + 1) \mu_u I(bn_m + n_u + 1 \leq C) + p(n_m, n_u - 1) \times \\ & \times \lambda_u I(n_u > 0) + p(n_m - 1, n_u) \lambda_m I(n_m > 0) + p(n_m + 1, n_u - 1) \times \\ & \times \lambda_u I(b(n_m + 1) + n_u > C, n_u > 0), \end{aligned} \quad (3)$$

где $(p(n_m, n_u))_{(n_m, n_u) \in N}$ – распределение вероятностей, $I(A)$ – индикатор случайного события:

$$I(A) = \begin{cases} 1, & \text{если событие } A \text{ произошло;} \\ 0, & \text{если событие } A \text{ не произошло.} \end{cases}$$

Элементы матрицы интенсивности переходов данной системы имеют следующий вид:

$$a((n_m, n_u), (n'_m, n'_u)) = \begin{cases} \lambda_m, & n'_m = n_m + 1, n'_u = n_u; \\ \lambda_u, & n'_m = n_m, n'_u = n_u + 1, \\ \text{или} \\ n'_m = n_m - 1, n'_u = n_u, & n_m > 0, \\ n'_u = C - (bn_m - 1); \\ n_m \mu_m, & n'_m = n_m - 1, n'_u = n_u - 1; \\ n_u \mu_u, & n'_m = n_m, n'_u = n_u - 1; \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases} \quad (4)$$

Вычислив стационарное распределение вероятностей $(p(n_m, n_u))_{(n_m, n_u) \in N}$, можно рассчитать следующие показатели эффективности системы:

– Среднее количество сессий eMBB / URLLC, $\overline{n_m}, \overline{n_u}$ соответственно:

$$\overline{n_m} = \sum_{n_m=1}^N n_m \cdot \sum_{n_u=0}^{C-bn_m} p(n_m, n_u); \quad (5)$$

$$\overline{n_u} = \sum_{n_u=1}^C n_u \cdot \sum_{n_m=0}^{\left\lfloor \frac{C-n_u}{b} \right\rfloor} p(n_m, n_u). \quad (6)$$

– Вероятность блокировки запросов сеансов eMBB (B_M) и сеансов URLLC (B_U):

$$B_M = \sum_{n_u=0}^C p\left(\left\lfloor \frac{C-n_u}{b} \right\rfloor, n_u\right); \quad (7)$$

$$B_U = p(0, C). \quad (8)$$

– Вероятность прерывания обслуживания запроса eMBB:

$$I = \sum_{n_m=1}^{N-1} p(n_m, C-bn_m) \frac{\lambda_u}{\lambda_u + n_m \mu_m + n_u \mu_u} \frac{1}{n_m} + p(N, C-bN) \frac{\lambda_u}{\lambda_u + n_m \mu_m + n_u \mu_u} \frac{1}{n_m}. \quad (9)$$

– Коэффициент использования системы:

$$UTIL = \frac{1}{C} \sum_{n_m=0}^N \sum_{n_u=0}^{C-bn_m} (bn_m + n_u) p(n_m, n_u). \quad (10)$$

3. Модель со снижением скорости обслуживания сессий eMBB

Рассмотрим вторую модель. В данном случае возможно наложение URLLC-трафика на уже находящуюся на обслуживании сессию eMBB при следующих условиях: в системе обслуживается по меньшей мере одна eMBB-сессия и в системе отсутствуют свободные ресурсные единицы. При наложении двух сессий находящаяся на обслуживании eMBB-сессия не прерывается, а происходит снижение выделения ресурсов на необходимое количество для URLLC-сессии. Максимальное количество сессий URLLC в одном блоке с eMBB-сессией может быть равно d , $d < b$.

Поэтому по сравнению с первой моделью пространство состояний имеет следующий вид:

$$N = \{(n_m, n_u) : n_m \geq 0, n_u \geq 0, (b-d)n_m + n_u \leq C, n_m \leq N\}. \quad (11)$$

При поступлении eMBB-сессии на обслуживание возможно следующее развитие событий:

- Если в системе имеется хотя бы один свободный ресурсный блок (b ресурсных единиц в ресурсном блоке), то новая сессия eMBB принимается к обслуживанию.
- Если в системе нет свободного ресурсного блока, то новая сессия eMBB блокируется.

При поступлении URLLC-сессии:

– Если в системе имеется хотя бы одна свободная ресурсная единица, то новая сессия URLLC принимается к обслуживанию.

– Если в системе нет свободной ресурсной единицы, в системе обслуживается как минимум одна eMBB-сессия и выполняется условие максимального количество сессий URLLC в одном блоке с eMBB-сессией, то происходит наложение URLLC сессии на eMBB сессию.

– Если в системе нет свободной ресурсной единицы, в системе обслуживается как минимум одна eMBB-сессия и не выполняется условие максимального количество сессий URLLC в одном блоке с eMBB-сессией, то eMBB-сессия блокируется и новая URLLC сессия поступает на обслуживание.

– Если в системе нет свободной ресурсной единицы и в системе не обслуживаются eMBB-сессии, то URLLC сессия блокируется.

Таким образом, возможные переходы для произвольного состояния $(n_m, n_u) \in N$ выглядят следующим образом:

$$\begin{cases} a(n_m, n_u)(n_m + 1, n_u) = \lambda_m, \\ a(n_m, n_u)(n_m, n_u + 1) = \lambda_u, \\ a(n_m, n_u)(n_m - 1, n_u + 1) = \lambda_u, \\ a(n_m, n_u)(n_m - 1, n_u) = n_m \mu_m, \\ a(n_m, n_u)(n_m, n_u - 1) = n_u \mu_u. \end{cases} \quad (12)$$

Общая структура диаграммы перехода между состояниями показана на рис. 4, а также для примера $C = 12, b = 3, N = 2, d = 2$ – на рис. 5.

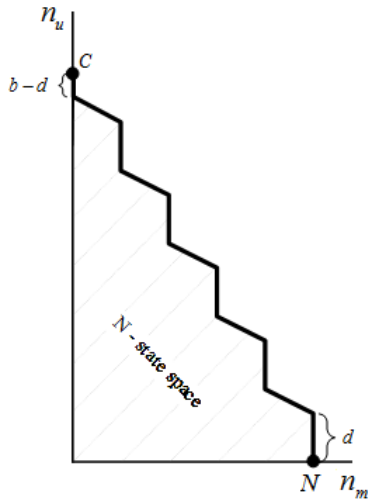


Рис. 4. Диаграмма переходов между состояниями в целом

Fig. 4. State transition diagram in general

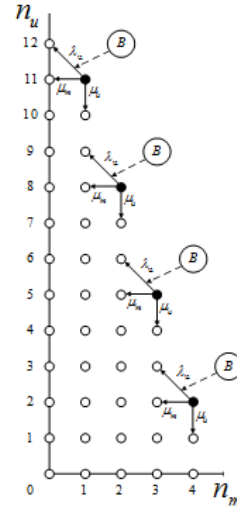


Рис. 5 Диаграмма переходов между состояниями в общем виде для примера $C = 12, b = 3, N = 2, d = 2$

Fig. 5. State transition diagram in general for example $C = 12, b = 3, N = 2, d = 2$

Система уравнений глобального баланса имеет вид:

$$\begin{aligned} & p(n_m, n_u) [\lambda_m I(bn_m + n_u + b \leq C) + \lambda_u [I((b-d)n_m + n_u + 1 \leq C) + \\ & \quad + I((b-d)n_m + n_u + 1 > C, n_m > 0)] + n_u \mu_u I(n_u > 0) + \\ & \quad + n_m \mu_m I(n_m > 0)] = p(n_m + 1, n_u) (n_m + 1) \mu_m I(bn_m + n_u + b \leq C) + \\ & \quad + p(n_m, n_u + 1) (n_u + 1) \mu_u \cdot I((b-d)n_m + n_u + 1 \leq C) + p(n_m, n_u - 1) \times \\ & \quad \times \lambda_u I(n_u > 0) + p(n_m - 1, n_u) \lambda_m I(n_m > 0) + p(n_m + 1, n_u - 1) \times \\ & \quad \times \lambda_u I((b-d)(n_m + 1) + n_u > C, n_u > 0), \end{aligned} \quad (13)$$

а элементы матрицы интенсивностей $a((n_m, n_u), (n'_m, n'_u))$ равны следующему:

$$a((n_m, n_u), (n'_m, n'_u)) = \begin{cases} \lambda_m, & n'_m = n_m + 1, n'_u = n_u; \\ \lambda_u, & n'_m = n_m, n'_u = n_u + 1, \\ \text{или} \\ n'_m = n_m - 1, n_m > 0, \\ n'_u = C - ((b-d)n_m - 1); \\ n_m \mu_m, & n'_m = n_m - 1, n'_u = n_u; \\ n_u \mu_u, & n'_m = n_m, n'_u = n_u - 1; \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases} \quad (14)$$

Вычислим стационарное распределение $(p(n_m, n_u))_{(n_m, n_u) \in \mathbb{N}}$, решив систему уравнений равновесия (13) для данной системы, и рассчитаем следующие показатели эффективности системы:

– Среднее количество сессий eMBB / URLLC, $\bar{n}_m$ и $\bar{n}_u$ соответственно:

$$\bar{n}_m = \sum_{n_m=1}^N n_m \cdot \sum_{n_u=0}^{C-(b-d)n_m} p(n_m, n_u); \quad (15)$$

$$\bar{n}_u = \sum_{n_u=1}^C n_u \cdot \sum_{n_m=0}^{\left\lfloor \frac{C-n_u}{b-d} \right\rfloor} p(n_m, n_u). \quad (16)$$

– Вероятность блокировки сеансов eMBB (B_M) и сеансов URLLC (B_U):

$$B_M = \sum_{n_u=0}^C p\left(\left\lfloor \frac{C-n_u}{b-d} \right\rfloor, n_u\right); \quad (17)$$

$$B_U = p(0, C). \quad (18)$$

– Вероятность прерывания обслуживания запроса eMBB:

$$I = \sum_{n_m=1}^N p(n_m, C - (b-d)n_m) \frac{\lambda_u}{\lambda_u + n_m \mu_m + n_u \mu_u} \frac{1}{n_m} \quad (19)$$

– Средняя скорость передачи сеансов eMBB:

$$\bar{b} = \frac{1}{\sum_{(n_m, n_u) \in \mathbb{N}_+ \cup \mathbb{N}_-} p(n_m, n_u)} \times \left[\sum_{(n_m, n_u) \in \mathbb{N}_+} b p(n_m, n_u) + \sum_{(n_m, n_u) \in \mathbb{N}_-} \frac{C-n_u}{n_m} p(n_m, n_u) \right], \quad (20)$$

где $\mathbb{N}_+ = (n_m, n_u) \in \mathbb{N} : n_m > 0, bn_m + n_u \leq C$ и $\mathbb{N}_- = (n_m, n_u) \in \mathbb{N} : n_m > 0, bn_m + n_u > C$.

– Коэффициент использования ресурсов системы:

$$UTIL = \frac{1}{C} \left(\left(\sum_{n_m=1}^N \sum_{n_u=0}^{C-n_m} (bn_m + n_u) p(n_m, n_u) \right) + 1 \right). \quad (21)$$

4. Примеры численного анализа

В этом разделе представлены результаты численного анализа двух систем. Рассмотрим среднее количество сессий eMBB и URLLC в системе. Пусть канал будет с разнесением поднесущих 120 кГц с 10 слотами, продолжительность каждого слота равна 1 мс. Поскольку разнесение поднесущих равно 120 кГц, количество мини-слотов равно 14, длительность каждого составляет 0,066 мс. Рассматриваемый радиоканал состоит из 15 ресурсных блоков (N), в каждом из которых 12 ресурсных единиц (b). Для численного анализа мы будем использовать два сценария с исходными данными (табл. 2).

Рассмотрим влияние интенсивностей поступления сеансов URLLC и eMBB на среднее число сеансов eMBB в системе для двух моделей (рис. 6–9), а также на среднее число сеансов URLLC в системе (рис. 10–13).

Системные параметры для численного анализа

Параметры	Сценарий 1	Сценарий 2
λ_m	0–1 000	100, 200, 300
λ_u	400, 500, 600	0–1 000
μ_m^{-1}	1^{-1}	1^{-1}
μ_u^{-1}	3^{-1}	3^{-1}
N	15	15
b	12	12
d	6	6

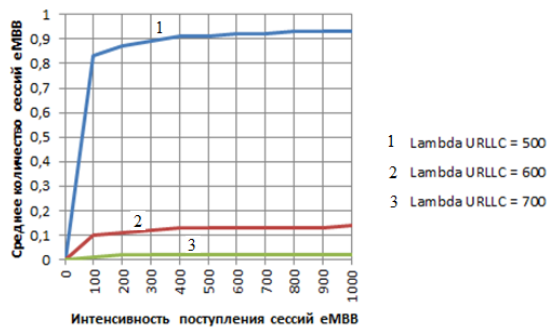


Рис. 6. Сценарий 1: Среднее количество сессий eMBB для 1-й модели
Fig. 6. Scenario 1: Average number of eMBB sessions for 1st model

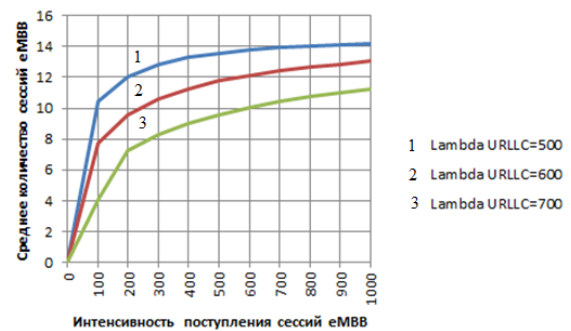


Рис. 7. Сценарий 1: Среднее количество сессий eMBB для 2-й модели
Fig. 7. Scenario 1: Average number of eMBB sessions for 2nd model

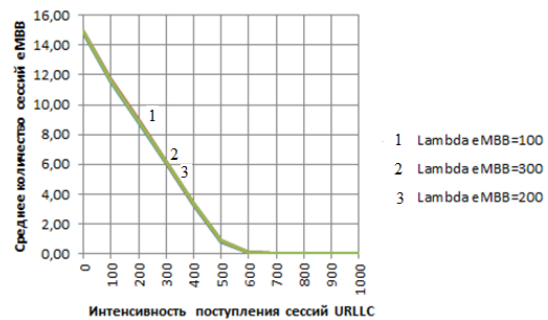


Рис. 8. Сценарий 2: Среднее количество сессий eMBB для 1-й модели
Fig. 8. Scenario 2: Average number of eMBB sessions for 1st model

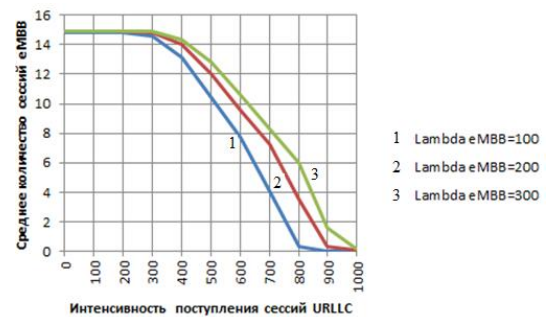


Рис. 9. Сценарий 2: Среднее количество сессий eMBB для 2-й модели
Fig. 9. Scenario 2: Average number of eMBB sessions for 2nd model

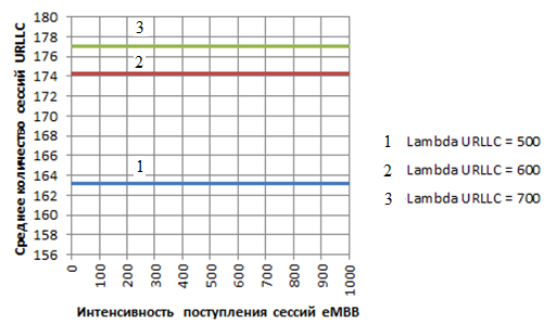


Рис. 10. Сценарий 1: Среднее количество сессий URLLC для 1-й модели
Fig. 10. Scenario 1: Average number of URLLC sessions for 1st model

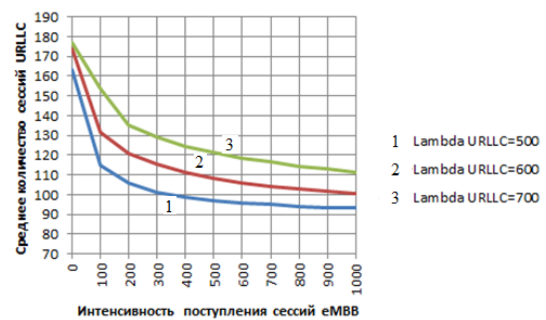


Рис. 11. Сценарий 1: Среднее количество сессий URLLC для 2-й модели
Fig. 11. Scenario 1: Average number of URLLC sessions for 2nd model

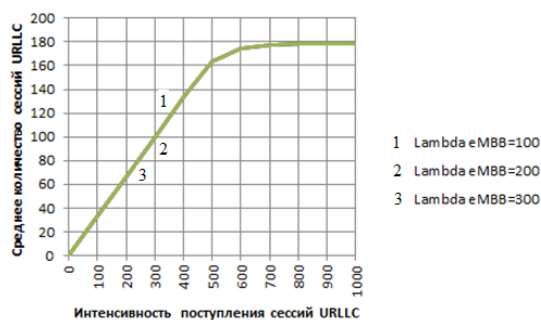


Рис. 12. Сценарий 2: Среднее количество сессий URLLC для 1-й модели

Fig. 12. Scenario 2: Average number of URLLC sessions for 1st model

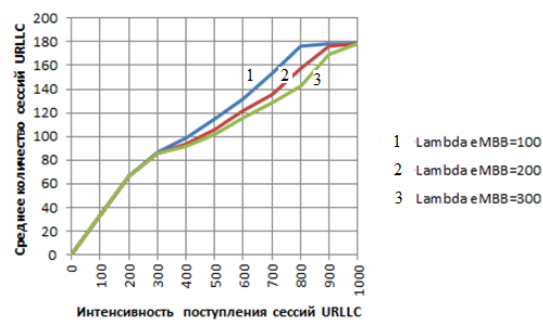


Рис. 13. Сценарий 2: Среднее количество сессий URLLC для 2-й модели

Fig. 13. Scenario 2: Average number of URLLC sessions for 2nd model

Как мы можем видеть на графиках на рис. 6, 8, в первой модели гораздо большее влияние на среднее количество сессий eMBB в системе оказывает интенсивность сеанса URLLC. Стоит отметить, что из графиков, приведенных на рис. 10, 12, можно сделать вывод о том, что в первой модели среднее количество сеансов URLLC в системе не зависит от интенсивности поступления сеансов eMBB. Это связано с тем, что сессии URLLC имеют приоритет по отношению к eMBB-сессиям из-за своих строгих требований к задержке передачи данных. Во второй же модели на исследуемые характеристики оказывают влияние две интенсивности поступления: и eMBB, и URLLC-сессий, это можно заметить на рис. 7, 9, 11, 13. Однако интенсивность поступления URLLC-сессий оказывает большее влияние на количество сессий двух типов в системах.

Таким образом, основываясь на результатах численного анализа, можно сделать вывод, что вторая модель с возможностью снижения скорости передачи сессий eMBB является наиболее эффективной, т.е. при таком принципе распределения ресурсов физического канала удастся обслужить больше сессий eMBB совместно с URLLC-сессиями, чем в первой модели.

Заключение

В этой работе нам удалось представить в виде мультисервисной модели Эрланга две системные модели, которые обеспечивают совместную передачу сеансов разных типов трафика – eMBB и URLLC – с разными правилами планирования передачи данных, и численно определить стационарные вероятности данных систем, с помощью которых вычислили вероятностно-временные характеристики. Также удалось провести численный анализ двух моделей, результаты которого показали, что в первой модели интенсивность поступления сессий eMBB не оказывает никакого влияния на среднее число и на вероятность блокировки сессий URLLC, данный факт объясняется абсолютным приоритетом сессий URLLC. На основе результатов численного анализа удалось сделать вывод, что второй вариант построения модели совместного использования расширенной мобильной широкополосной связи eMBB и сверхнадежной связи с низкой задержкой URLLC с возможностью снижения скорости передачи данных eMBB сессий является более эффективным, чем первый вариант.

Благодарность. Авторы благодарят аспиранта кафедры прикладной информатики и теории вероятностей РУДН Т.Р. Велиеву за вклад в проведение численного эксперимента.

ЛИТЕРАТУРА

1. Gerasimenko M., Moltchanov D., Andreev S., Koucheryavy Ye., Himayat N., Shu-Ping Yeh, Talwar S. Adaptive resource management strategy in practical multi-radio heterogeneous networks // IEEE Access. 2017. V. 5. P. 219–235.
2. Anand A., de Veciana G., Shakkottai S. Joint Scheduling of URLLC and eMBB Traffic in 5G Wireless Networks // IEEE INFOCOM2018 – IEEE Conf. on Computer Communications. 2018. October. DOI: 10.1109/INFOCOM.2018.8486430.
3. Begishev V., Petrov V., Samuylov A., Moltchanov D., Andreev S., Koucheryavy Ye., Samouylov K. Resource Allocation and sharing for heterogeneous data collection over conventional 3GPP LTE and emerging NB-IoT technologies // Computer Communications. 2018. V. 120. P. 93–101.

4. Markova E., Moltchanov D., Gudkova I., Samouylov K. Koucharyavy performance assessment of QoS-Aware LTE sessions offloading onto LAA/WiFi systems // *IEEE Access*. 2019. V. 7. March. P. 36300–36311. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2905035.
5. Tang J., Shim B., Quek T.Q.S. Service multiplexing and revenue maximization in sliced C-RAN incorporated with URLLC and multicast eMBB // *IEEE J. on Selected Areas in Communications*. 2019. V. 37 (4). Article No. 8638932. P. 881–895.
6. Semari O., Saad W., Bennis M., Debbah M. Integrated millimeter wave and sub-6 GHz wireless networks: a roadmap for joint mobile broadband and ultra-reliable low-latency communications // *IEEE Wireless Communications*. 2019. V. 26 (2). Article No. 8642794. P. 109–115.
7. Guan W., Wen X., Wang L., Lu Z., Shen Y. A service-oriented deployment policy of end-to-end network slicing based on complex network theory // *IEEE Access*. 2018. V. 6. P. 19691–19701.
8. Soldani D. 5G beyond radio access: a flatter sliced network // *MondoDigitale*. 2018. V. 17 (74).
9. Popovski P., Trillingsgaard K.F., Simeone O., Durisi G. 5G wireless network slicing for eMBB, URLLC, and mMTC: a communication-theoretic view // *IEEE Access*. 2018. V. 6. Article No. 8476595. P. 55765–55779.
10. Jaradat A.M., Hamamreh J.M., Arslan H. Modulation options for OFDM-Based waveforms: Classification, Comparison, and Future Directions // *IEEE Access*. 2019. V. 7. Article No. 8631007. P. 17263–17278.
11. Hamamreh J.M., Ankarali Z.E., Arslan H. CP-Less OFDM with Alignment Signals for Enhancing Spectral Efficiency, Reducing Latency, and Improving PHY Security of 5G Services // *IEEE Access*. 2018. V. 6, Article No. 8501913. P. 63649–63663.
12. Kassab R., Simeone O., Popovski P., Islam T. Non-Orthogonal multiplexing of ultra-reliable and broadband services in fog-radio architectures // *IEEE Access*. 2019. V. 7. Article No. 8612914. P. 13035–13049.
13. Matera A., Kassab R., Simeone O., Spagnolini U. Non-Orthogonal eMBB-URLLC radio access for cloud radio access networks with analog fronthauling // *Entropy*. 2018. V. 20 (9). Article No. 661.

Поступила в редакцию 30 октября 2019 г.

Makeeva E.D., Polyakov N.A., Kharin P.A., Gudkova I.A. (2020) PROBABILITY MODEL FOR PERFORMANCE ANALYSIS OF JOINT URLLC AND eMBB TRANSMISSION IN 5G NETWORKS. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika* [Tomsk State University Journal of Control and Computer Science]. 52. pp. 33–42

DOI: 10.17223/19988605/52/4

The eMBB and URLLC collaboration system with two models of resource allocation planning is considered. Poisson streams of two types of traffic arrive at the system input. The system is determined by the following parameters: the number of resource blocks, the number of resource units, the maximum number of URLLC sessions in one block with an eMBB session.

The discipline of servicing the first model is defined as follows: the system receives applications eMBB and URLLC, with free resources all types of traffic are accepted. In the absence of free resource blocks, new eMBB sessions are blocked. In the absence of free single resources and at least one eMBB session, the new URLLC session blocks the active eMBB session. In the absence of free single resources and the absence of active eMBB sessions in the system, the new URLLC session is blocked. The service discipline of the second model is determined in a similar way with the following exception: in the absence of free unit resources and the presence of at least one eMBB session and the condition is met for the maximum number of URLLC sessions in one block with an eMBB session, then the URLLC session is superimposed on the eMBB session. In the absence of free single resources and the presence of at least one eMBB session, the condition for the maximum number of URLLC sessions in one block with the eMBB session is not fulfilled, then the eMBB session is blocked to serve the URLLC session.

The paper presents the results of a numerical analysis of the probability-time characteristics of two models.

Keywords: eMBB-URLLC; joint using; multiple access; NOMA; OMA; slots; mini-slots; queuing systems.

MAKEEVA Elena Dmitrievna (RUDN University, Moscow, Russian Federation).
E-mail: len16730637@yandex.ru

POLYAKOV Nikita Alexseevich (RUDN University, Moscow, Russian Federation).
E-mail: goto97@mail.ru

KHARIN Petr Aleksandrovich (Post-graduate Student, RUDN University, Moscow, Russian Federation).
E-mail: gruzavjeg@mail.ru

GUDKOVA Irina Andreevna (Candidate of Physical and Mathematical Sciences, RUDN University, Moscow, Russian Federation).
E-mail: gudkova-ia@rudn.ru

REFERENCES

1. Gerasimenko, M., Moltchanov, D., Andreev, S., Koucheryavy, Ye., Himayat, N., Shu-Ping Yeh, & Talwar, S. (2017) Adaptive Resource Management Strategy in Practical Multi-Radio Heterogeneous Networks. *IEEE Access*. 5. pp. 219–235. DOI: 10.1109/ACCESS.2016.2638022

2. Anand, A., de Veciana, G. & Shakkottai, S. (2018) Joint scheduling of URLLC and eMBB traffic in 5G wireless networks. *IEEE INFOCOM2018 – IEEE Conf. on Computer Communications*, October. DOI: 10.1109/INFOCOM.2018.8486430
3. Begishev, V., Petrov, V., Samuylov, A., Moltchanov, D., Andreev, S., Koucheryavy, Ye. & Samouylov, K. (2018) Resource Allocation and sharing for heterogeneous data collection over conventional 3GPP LTE and emerging NB-IoT technologies. *Computer Communications*. 120. pp. 93–101. DOI: 10.1016/j.comcom.2018.01.009
4. Markova, E., Moltchanov, D., Gudkova, I. & Samouylov, K. (2019) Koucheryavy performance assessment of QoS-Aware LTE sessions offloading Onto LAA/WiFi systems. *IEEE Access*. 7. pp. 36300–36311. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2905035
5. Tang, J., Shim, B. & Quek, T.Q.S. (2019) Service multiplexing and revenue maximization in sliced C-RAN incorporated with URLLC and multicast eMBB. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 37(4). Art. no. 8638932. pp. 881–895. DOI: 10.1109/JSAC.2019.2898745
6. Semiani, O., Saad, W., Bennis, M. & Debbah, M. (2019) Integrated millimeter wave and sub-6 GHz wireless networks: A roadmap for joint mobile broadband and ultra-reliable low-latency communications. *IEEE Wireless Communications*. 26(2). Art. no. 8642794. pp. 109–115. DOI: 10.1109/MWC.2019.1800039
7. Guan, W., Wen, X., Wang, L., Lu, Z. & Shen, Y. (2018) A service-oriented deployment policy of end-to-end network slicing based on complex network theory. *IEEE Access*. 6. pp. 19691–19701. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2822398
8. Soldani, D. (2018) 5G beyond radio access: A flatter sliced network. *Mondo Digitale*. 17(74).
9. Popovski, P., Trillingsgaard, K.F., Simeone, O. & Durisi, G. (2018) 5G wireless network slicing for eMBB, URLLC, and mMTC: A communication-theoretic view. *IEEE Access*. 6. Art. no. 8476595. pp. 55765–55779. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2872781
10. Jaradat, A.M., Hamamreh, J.M. & Arslan, H. (2019) Modulation options for OFDM-based waveforms: Classification, Comparison, and Future Directions. *IEEE Access*. 7. Art. no. 8631007. pp. 17263–17278. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2895958
11. Hamamreh, J.M., Ankarali, Z.E. & Arslan, H. (2018) CP-Less OFDM with alignment signals for enhancing spectral efficiency, reducing latency, and improving PHY security of 5G services. *IEEE Access*. 6. Art. no. 8501913. pp. 63649–63663. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2877321
12. Kassab, R., Simeone, O., Popovski, P. & Islam, T. (2019) Non-Orthogonal Multiplexing of Ultra-Reliable and Broadband Services in Fog-Radio Architectures. *IEEE Access*. 7. Art. no. 8612914. pp. 13035–13049. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2893128
13. Matera, A., Kassab, R., Simeone, O. & Spagnolini, U. (2018) Non-Orthogonal eMBB-URLLC radio access for cloud radio access networks with analog fronthauling. *Entropy*. 20(9). Art. no. 661. DOI: 10.3390/e20090661