

Сопин Э.С.^{1,2}, Гудкова И.А.^{1,2}, Маркова Е.В.¹, Агеев К.А.¹

¹ Российский университет дружбы народов, г. Москва, Россия

² Институт проблем информатики ФИЦ ИУ РАН, г. Москва, Россия

АППРОКСИМАЦИЯ ФУНКЦИИ ТРЕБОВАНИЙ К РЕСУРСАМ ДЛЯ АНАЛИЗА ХАРАКТЕРИСТИК ТРАФИКА МЕЖМАШИННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

АННОТАЦИЯ

В статье исследуются характеристики трафика межмашинного взаимодействия (Machine-to-Machine, M2M) в системе мобильной связи LTE. Рассматривается один из планировщиков, выделяющий радиоресурсы долями временного кадра. Для данного планировщика получена функция распределения требований к временным ресурсам при передаче M2M трафика. Полученная функция распределения аппроксимируется гамма-распределением, которое используется для вычисления вероятности блокировки M2M сессии и среднего значения доли занятых ресурсов на основе результатов анализа системы массового обслуживания с ограниченными ресурсами и случайными требованиями.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

LTE; M2M трафик; разделение ресурсов; случайные требования, система массового обслуживания, ограниченные ресурсы.

Sopin E.S.^{1,2}, Gudkova I.A.^{1,2}, Markova E.V.¹, Ageyev K.A.¹

¹ RUDN University, Moscow, Russia

² Institute of Informatics Problems, FRC CSC RAS, Moscow, Russia

APPROXIMATION OF RESOURCE REQUIREMENTS DISTRIBUTION FOR THE ANALYSIS OF M2M TRAFFIC CHARACTERISTICS

ABSTRACT

In the paper, M2M traffic characteristics in LTE mobile network are investigated. A specific resource scheduler based on the full power policy is considered. For the considered scheduler, the cumulative distribution function of resource requirements of M2M sessions is derived. Then, we approximate it by gamma distribution, which is used to evaluate the session blocking probability and average number of occupied resources by means of a queuing system with random requirements and limited resources.

KEYWORDS

LTE; M2M traffic; resource allocation; random requirements; queuing system; limited resources.

Введение

В настоящее время одним из основных параметров, необходимых для определения показателей качества обслуживания (Quality of Service, QoS) в беспроводных сетях [1], стала удаленность устройств от базовой станции (БС). В связи с резко растущим объемом трафика, генерируемого в беспроводных сетях различными приложениями, возникает проблема нехватки частотного диапазона. Одним из возможных решений такой проблемы является применение различных планировщиков управления частотно-временными ресурсами, которые позволяют учесть расстояние от устройства до БС. В качестве примеров таких планировщиков можно привести планировщики «ground robin» (RR) и «full power» (FP), работа которых основана на различных вариациях параметров ресурсного блока – частоты, мощности и времени [2–5]. Оба планировщика используют фиксированную ширину полосы частот, а временной ресурс и мощность передачи сигнала могут изменяться. Планировщик RR основан на равномерном распределении временного ресурса между всеми обслуживаемыми устройствами. Планировщик FP основан на передаче данных

с максимальной мощностью.

Описание модели

Рассмотрим одну соту беспроводной сети радиуса R . Предположим, что устройства являются стационарными и распределены по территории соты равномерно. С интенсивностью λ они переходят в активное состояние и передают данные с интенсивностью μ в восходящем канале (uplink channel). Обозначим ξ_d расстояние от устройства до БС, p_{\max} максимальную мощность передачи сигнала устройством, $\xi_p \leq p_{\max}$ текущую мощность передачи. Отметим, что ξ_d и ξ_p являются случайными величинами (СВ). Предположим, что устройства передают данные с гарантированной скоростью r_0 . Достижимая устройством скорость передачи данных $r(\xi_d, \xi_p)$ зависит от ширины полосы частот ω восходящего канала, мощности передачи сигнала ξ_p , удаленности ξ_d от БС и определяется как $r(\xi_d, \xi_p) = \omega \ln \left(1 + \frac{G \xi_p}{\xi_d^\kappa N_0} \right)$. Все основные обозначения представлены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры модели

Параметр	Описание
Параметры соты	
R	радиус соты [м]
ω	ширина полосы частот [Гц]
Параметры M2M устройств	
N	максимальное число активных устройств в соте
λ	интенсивность перехода устройства в активное состояние [1/с]
μ^{-1}	среднее время сессии (временной интервал, когда устройство активно) [с]
$\rho = \lambda \mu^{-1}$	интенсивность предложенной нагрузки
ξ_d	расстояние до БС (СВ) [м]
p_{\max}	максимальная мощность сигнала [Вт]
ξ_p	мощность сигнала (СВ) [Вт]
r_0	гарантированная скорость передачи данных [бит/с]
$r(\xi_d, \xi_p)$	достижимая скорость передачи данных при условии, что устройство находится на расстоянии ξ_d и мощность сигнала ξ_p (СВ) [бит/с]
$F_{\xi_\delta}(\delta)$	ФР требования к доли временного ресурса (кадра)
$f_{\xi_\delta}(\delta)$	плотность распределения требования к доли временного ресурса (кадра)
Параметры среды	
свободное распространение сигнала (free space)	
N_0	мощность шума [Гц]
G	коэффициент затухания сигнала
κ	степень затухания сигнала

Планировщик ресурсов

Рассмотрим на примере принцип работы одного из планировщиков, используемого далее в статье, планировщика FR (рисунок 1). Пусть в соте расположены три устройства – первое и второе устройства неподвижны и расположены соответственно на расстоянии $\xi_d = d_1$ и $\xi_d = d_2$ от БС. Третье устройство может быть расположено либо близко к БС на расстоянии $\xi_d = d_3^A$, либо далеко – $\xi_d = d_3^B$. Все устройства работают на максимальной мощности, а временной ресурс делится пропорционально достижимой скорости передачи $r(\xi_d, \xi_p)$. В случае А третье устройство получает достаточный для достижения гарантированной скорости r_0 временной интервал обслуживания и начинает обслуживаться (рисунок 2). В случае В устройство находится далеко и не может получить

достаточный для достижения гарантированной скорости r_0 временной интервал, поэтому его запрос на обслуживание блокируется (рисунок 3).

$$r_0 = 1 \text{ Мбит/с}, r_1 = 4 \text{ Мбит/с}, r_2 = 2.5 \text{ Мбит/с}, r_3^A = 4 \text{ Мбит/с}, r_3^B = 2 \text{ Мбит/с}$$

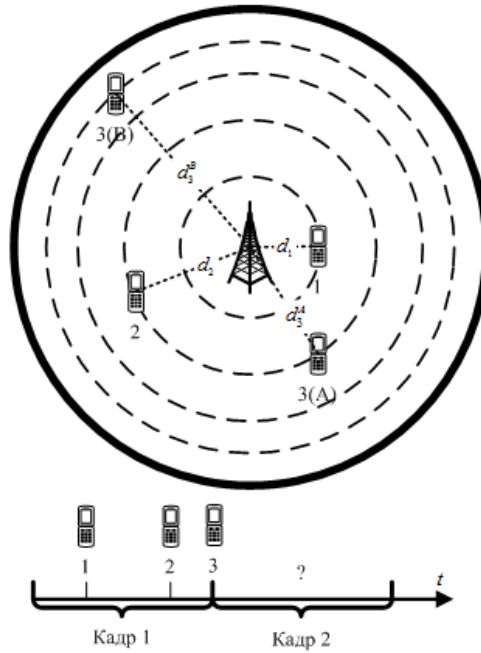


Рис.1. Пример расположения и активации устройств в сети

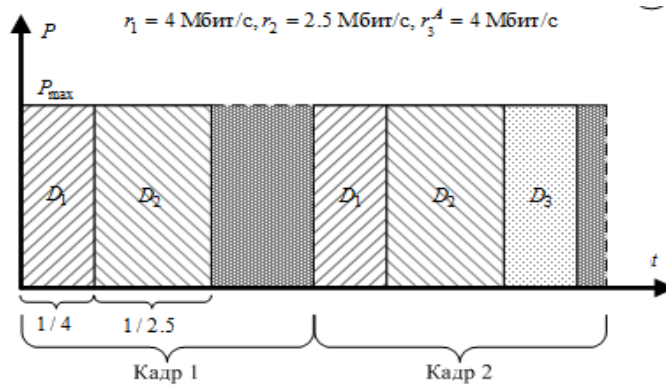


Рис.2. Схема занятия временного ресурса (кадра) в случае А – близко расположенного к БС устройства

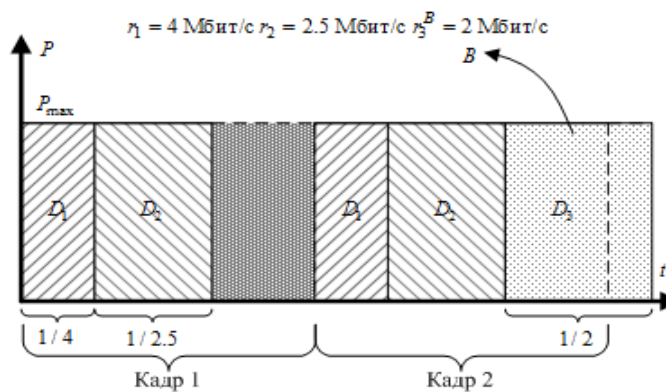


Рис.3. Схема занятия временного ресурса (кадра) в случае В – далеко расположенного от БС устройства

Функция распределения требований к ресурсам

С учетом описанных в предыдущем разделе особенностей планировщика FR, выведем для него ФР $F_{\xi_{\delta}}^r(\delta)$ требования к доли временного ресурса. Введем дополнительные обозначения – ξ_{ω}

СВ ширины полосы частот, ξ_δ СВ доли временного ресурса. Ввиду того что текущая мощность передачи сигнала и ширина полосы частот канала являются для данного планировщика постоянными, т.е. равны P_{\max} и ω соответственно, то

$F_{\xi_p, \xi_\omega, \xi_\delta}(p, \omega, \delta) = P\{\xi_p < p, \xi_\omega < \omega, \xi_\delta < \delta\} = P\{\xi_\delta < \delta\} = F_{\xi_\delta}(\delta)$ и имеет вид

$$F_{\xi_\delta}(\delta) = P\left\{\frac{r_0}{r(\xi_d, P_{\max})} < \delta\right\} = \begin{cases} 0, & \delta \leq 0, \\ \frac{1}{R^2} \left(\frac{GP_{\max}}{N_0}\right)^{2/\kappa} \cdot \left(e^{\frac{r_0}{\delta\omega}} - 1\right)^{-2/\kappa}, & \delta \in (0, \phi], \\ 1, & \delta > \phi, \end{cases} \quad (1)$$

где $\phi = \frac{r_0}{\omega \ln\left(\frac{GP_{\max}}{N_0 R^\kappa} + 1\right)}$. Соответствующая плотность $f_{\xi_\delta}(\delta)$ распределения определяется по

формуле

$$f_{\xi_\delta}(\delta) = \begin{cases} \frac{2r_0}{R^2 \omega \kappa} \left(\frac{GP_{\max}}{N_0}\right)^{2/\kappa} \cdot \frac{e^{\frac{r_0}{\delta\omega}}}{\delta^2} \left(e^{\frac{r_0}{\delta\omega}} - 1\right)^{\frac{-2+\kappa}{\kappa}}, & \delta \in (0, \phi], \\ 0, & \delta \notin (0, \phi]. \end{cases} \quad (2)$$

С учетом полученной ФР (1), показатели качества обслуживания М2М трафика могут быть получены в терминах многолинейной системы массового обслуживания (СМО) со случайными требованиями и ограниченным ресурсом объема [6–8]. В данной СМО заявки при поступлении на обслуживание, помимо занятия прибора, занимают также и часть доступного ресурса, которая определяется заданной ФР. В рассматриваемой нами системе таким ресурсом является доля временного ресурса, который выделяется М2М сессиям. Таким образом, значение ресурса, которое требуется системе, не превышает 1 и находится в промежутке $[0; 1]$. Тогда согласно [6], формулы для расчета вероятности блокировки B и среднего значения b доли временного ресурса имеют вид

$$B = 1 - p_0 \sum_{k=0}^{N-1} F_{\xi_\delta}^{(k+1)}(1) \frac{\rho^k}{k!}, \quad (3)$$

$$b = p_0 \sum_{k=1}^N b_k \frac{\rho^k}{k!}, \quad b_k = \int_0^1 \delta F_{\xi_\delta}^{(k)}(d\delta), \quad (4)$$

$$p_0 = \left(1 + \sum_{k=1}^N F_{\xi_\delta}^{(k)}(1) \frac{\rho^k}{k!}\right)^{-1}, \quad (5)$$

где p_0 – вероятность того, что система пуста, а $F_{\xi_\delta}^{(k)}(\delta)$ – k -кратная свертка ФР $F_{\xi_\delta}(\delta)$.

Отметим, что вычисление сверток ФР непрерывных СВ численными методами приводит к существенным вычислительным сложностям. В связи с этим, ФР требований к ресурсам была аппроксимирована другими распределениями, поведение плотности которых схоже с поведением исходной плотности (2).

Аппроксимация функции распределения требований к ресурсам

По исходным данным из таблицы 2 получена плотность распределения по формуле (2) для $\delta \in (0, \phi]$. Учитывая необходимость вычисления сверток аналитически, аппроксимировать исходную ФР лучше всего бесконечно делимыми распределениями с носителем на положительной полуоси. Таким распределением является гамма-распределение с плотностью

$$f_{\text{gamma}}(\delta) = \frac{\delta^{\alpha-1} e^{-\delta/\beta}}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \approx f_{\xi_\delta}(\delta). \quad (6)$$

Подбор параметров α и β выполнен с помощью средств языка программирования Java и подтвердился при подборе параметров распределения в системе Matlab. Параметры имеют следующий значения: $\alpha = 2.12$, $\beta = 0.00972$. На рисунках 4 и 5 показаны графики сравнения исходной и аппроксимированной плотности. По свойству гамма-распределения, если $\delta_1, \dots, \delta_k$

независимые СВ, такие что $\delta_i \sim \Gamma(\alpha, \beta)$, то распределение их суммы имеет следующий вид $\sum_{i=1}^k \delta_i \sim \Gamma(k\alpha, \beta)$. Таким образом, плотность k -кратной свертки распределения требований к ресурсам имеет вид:

$$f_{\text{gamma}}^{(k)}(\delta) = \frac{\delta^{k\alpha-1} e^{-\delta/\beta}}{\beta^{k\alpha} \Gamma(k\alpha)} \approx f_{\xi_\delta}^{(k)}(\delta). \quad (7)$$

Таблица 2. Исходные данные для численного анализа

Параметр	Значение
R	100 м
ω	10 МГц
N	5, 20, 100
P_{max}	0.00398 Вт
r_0	100 Кбит/с
λ	150 – 700 1/с
μ^{-1}	0.14 с
N_0	10^{-9} Вт
G	197.43
κ	5

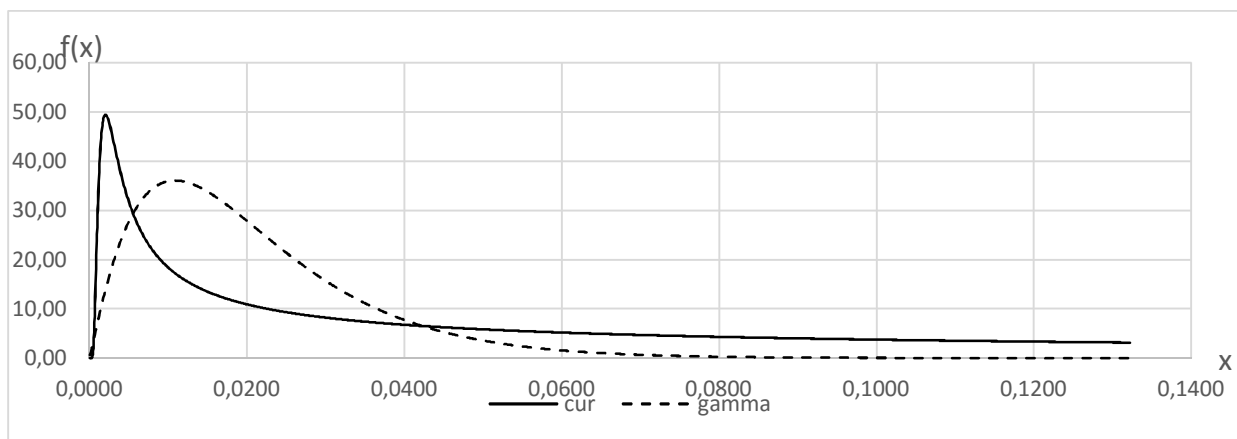


Рис. 4. Плотность распределения $f_{\xi_\delta}(\delta)$ и ее аппроксимация $f_{\text{gamma}}(\delta)$ гамма-распределением

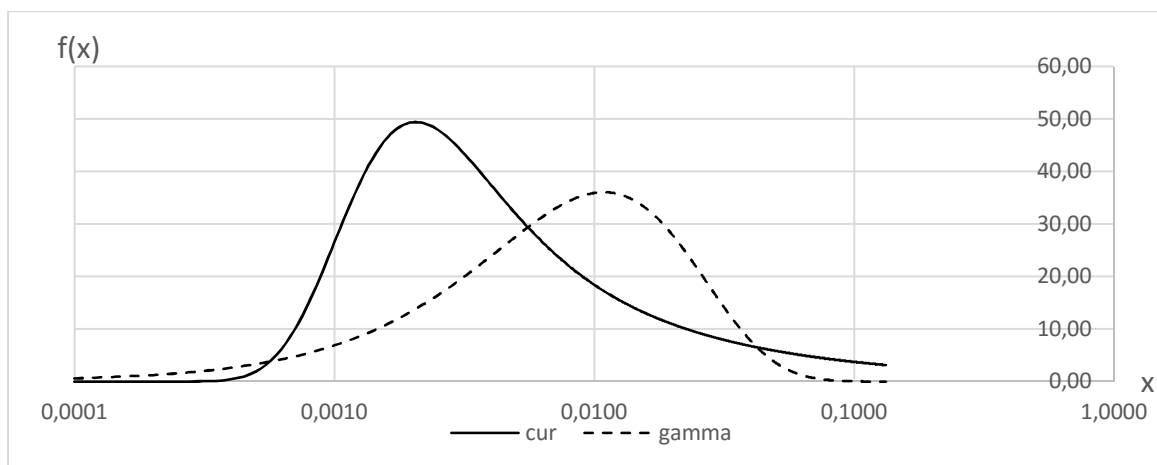


Рис. 5. Плотность распределения $f_{\xi_\delta}(\delta)$ и ее аппроксимация $f_{\text{gamma}}(\delta)$ гамма-распределением (логарифмическая шкала)

Пример численного анализа

Для вычисления вероятностно-временных характеристик модели [6–8] необходимо вычислить свертку плотности распределения по формуле (7). На основе исходных данных из таблицы 2 были посчитаны вероятности блокировок для различных значений нагрузки ρ . На рисунке 6 отображено сравнение вероятностей блокировок заявок для систем с различным числом приборов. Для систем с большим числом приборов вероятность потери заявок меньше. При увеличении нагрузки ρ для одного и того же числа приборов вероятность блокировки увеличивается. Отметим, что при малых значениях N вероятность блокировки обусловлена в большей степени нехваткой приборов, в отличие от случая $N = 100$. Для случая $N = 100$ (таблица 3) произведен расчет среднего объема занятого ресурса b , при увеличении нагрузки объем занятого ресурса увеличивается. В связи с тем, что плотность гамма распределения с достаточно большой погрешностью приближает поведение исходной плотности распределения, полученные результаты можно считать приближительными.

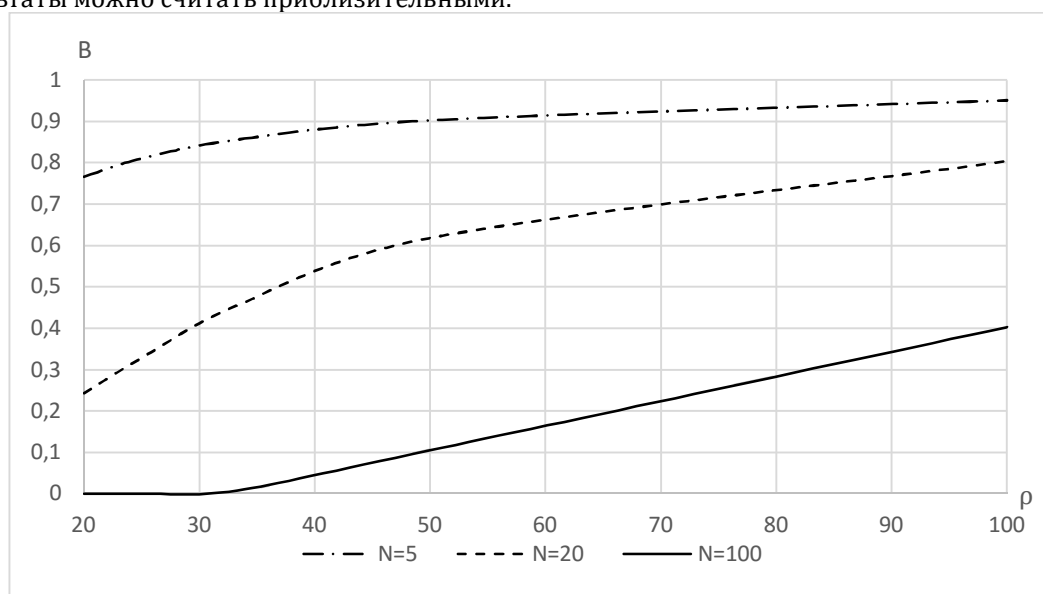


Рис.6. Вероятность блокировки B для $N = 5, 20, 100$

Таблица 3. Вероятность блокировки B и среднее значение доли временного ресурса b для $N = 100$

ρ	B	b
20.0	0.000004	0.4131
25.0	0.0002	0.5162
33.3	0.0079	0.6801
50.0	0.1047	0.8753
100.0	0.4027	0.9655

Заключение

В работе проведен анализ характеристик передачи M2M трафика в беспроводной сети при использовании планировщика, выделяющего радиоресурсы долями временного кадра. Получен вид ФР $F_{\xi\delta}(\delta)$ требований M2M сессий к ресурсам сети. Ввиду сложности расчетов показателей качества на основе результатов анализа СМО со случайными требованиями и ограниченными ресурсами, предложена аппроксимация гамма-распределением. В рамках дальнейших исследований будет реализован метод дискретизации ФР, позволяющий получить аппроксимацию с произвольной точностью.

Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов №№ 15-07-03051, 15-07-03608, 16-37-60103, 16-07-00766.

Литература

1. 3GPP TS 36.300: Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Overall description; Stage 2 (Release 14).
2. Galinina O, Andreev S, Turlikov A, and Koucheryavy Y. Optimizing energy efficiency of a multi-radio mobile device in heterogeneous beyond-4G networks // Performance Evaluation. – 2014. – Vol. 78. – P. 18–41.
3. Ahmadian A., Galinina O.S., Gudkova I.A., Andreev S.D., Shorgin S.Ya., and Samouylov K.E. On capturing spatial diversity of joint M2M/H2H dynamic uplink transmissions in 3GPP LTE cellular system // Lecture Notes in Computer Science. – 2015. – Vol. 9247. – P. 407–421.
4. Samouylov K., Gudkova I., Markova E., and Dzantiev I. On analyzing the blocking probability of M2M transmissions for a CQI-based RRM scheme model in 3GPP LTE // Communications in Computer and Information Science. – 2016. – Vol. 638. – P. 327–340.
5. Gudkova I., Markova E., Masek P., Andreev S., Hosek J., Yarkina N., Samouylov K., and Koucheryavy Y. Modeling the utilization of a multi-tenant band in 3GPP LTE system with Licensed Shared Access // Proc. of the 8th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems ICUMT-2016 (October 18–20, 2016, Lisbon, Portugal). – USA, New Jersey, Piscataway, IEEE. – 2016. – P. 179–183.
6. Naumov V., Samouylov K., Yarkina N., Sopin E., Andreev S., and Samuylov A. LTE performance analysis using queuing systems with finite resources and random requirements // Proc. of the 7th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems ICUMT-2015 (October 6–8, 2015, Brno, Czech Republic). – USA, New Jersey, Piscataway, IEEE. – 2015. – P. 100–103.
7. Sopin E., Samouylov K., Vikhrova O., Kovalchukov R., Moltchanov D., and Samuylov A. Evaluating a case of downlink uplink decoupling using queuing system with random requirements // Lecture Notes in Computer Science. – 2016. – Vol. 9870. – P. 440–450.
8. Вихрова О.Г., Самуйлов К.Е., Сопин Э.С., Шоргин С.Я. К анализу показателей качества обслуживания в современных беспроводных сетях // Информатика и ее применение. – 2015. – Т. 9, № 4. – С. 48–55.

References

1. 3GPP TS 36.300: Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Overall description; Stage 2 (Release 14).
2. Galinina O, Andreev S, Turlikov A, and Koucheryavy Y. Optimizing energy efficiency of a multi-radio mobile device in heterogeneous beyond-4G networks // Performance Evaluation. – 2014. – Vol. 78. – P. 18–41.
3. Ahmadian A., Galinina O.S., Gudkova I.A., Andreev S.D., Shorgin S.Ya., and Samouylov K.E. On capturing spatial diversity of joint M2M/H2H dynamic uplink transmissions in 3GPP LTE cellular system // Lecture Notes in Computer Science. – 2015. – Vol. 9247. – P. 407–421.
4. Samouylov K., Gudkova I., Markova E., and Dzantiev I. On analyzing the blocking probability of M2M transmissions for a CQI-based RRM scheme model in 3GPP LTE // Communications in Computer and Information Science. – 2016. – Vol. 638. – P. 327–340.
5. Gudkova I., Markova E., Masek P., Andreev S., Hosek J., Yarkina N., Samouylov K., and Koucheryavy Y. Modeling the utilization of a multi-tenant band in 3GPP LTE system with Licensed Shared Access // Proc. of the 8th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems ICUMT-2016 (October 18–20, 2016, Lisbon, Portugal). – USA, New Jersey, Piscataway, IEEE. – 2016. – P. 179–183.
6. Naumov V., Samouylov K., Yarkina N., Sopin E., Andreev S., and Samuylov A. LTE performance analysis using queuing systems with finite resources and random requirements // Proc. of the 7th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems ICUMT-2015 (October 6–8, 2015, Brno, Czech Republic). – USA, New Jersey, Piscataway, IEEE. – 2015. – P. 100–103.
7. Sopin E., Samouylov K., Vikhrova O., Kovalchukov R., Moltchanov D., and Samuylov A. Evaluating a case of downlink uplink decoupling using queuing system with random requirements // Lecture Notes in Computer Science. – 2016. – Vol. 9870. – P. 440–450.
8. Vikhrova O., Samouylov K., Sopin E., and Shorgin S. On performance analysis of modern wireless networks // Informatika i ee primeneniye. – 2015. – Vol. 9, No. 4. – P. 48–55.

Поступила: 15.10.2016

Об авторах:

Сопин Эдуард Сергеевич, доцент кафедры прикладной информатики и теории вероятности Российского университета дружбы народов, старший научный сотрудник Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управления» РАН, кандидат физико-математических наук, sopin_es@pfur.ru;

Гудкова Ирина Андреевна, доцент кафедры прикладной информатики и теории вероятности Российского университета дружбы народов, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управления» РАН, кандидат физико-математических наук, доцент, gudkova_ia@pfur.ru;

Маркова Екатерина Викторовна, старший преподаватель кафедры прикладной информатики и теории вероятности Российского университета дружбы народов, кандидат физико-математических наук, markova_ev@pfur.ru;

Агеев Кирилл Анатольевич, студент Российского университета дружбы народов, kaageyev@gmail.com.