

**МОДЕЛЬ ВЫДЕЛЕНИЯ ТРЕБУЕМОЙ СКОРОСТИ ПЕРЕДАЧИ  
В НИСХОДЯЩЕМ КАНАЛЕ СВЯЗИ ТЕХНОЛОГИИ LTE****Введение**

В технологии LTE (Long-Term Evolution), разработанной 3GPP (3rd Generation Partnership Project), одним из эффективных путей повышения производительности и улучшения основных показателей качества обслуживания (Quality of Service, QoS) является усовершенствование сетевых протоколов и механизмов, отвечающих за планирование доступных сетевых ресурсов. К подобного рода ресурсам, прежде всего, относятся временной ресурс – OFDM-символы (Orthogonal frequency-division multiplexing) и частотный ресурс – частотные поднесущие, которые могут быть объединены в логические подканалы. Под OFDM-символом понимается промежуток времени, на протяжении которого амплитуда и фаза модулируемых поднесущих неизменна. Необходимо заметить, что решение задачи о выделении радиоресурсов в первую очередь основывается на требованиях к QoS [1 – 4] и может быть положено на систему управления радиоресурсом (Radio Resource Management, RRM), а именно – на планировщик (scheduler). В технологии LTE, как и в HSDPA или WiMAX, механизмы планирования ресурсов нисходящего канала связи (DownLink) не определены стандартом, оставляя право выбора за производителями оборудования базовых станций (evolved NodeB, eNodeB) [5 – 7].

Результатом решения задачи распределения частотного и временного ресурсов должно быть закрепление блоков планирования (Scheduling Block, SB) за пользовательскими станциями (User Equipment, UE) в нисходящем канале связи одного кадра. Блок планирования является наименьшим структурным элементом, выделяемым одной пользовательской станции и формируемый двумя соседними ресурсными блоками (Resource Block, RB) на одинаковых поднесущих (subcarrier) [8]. Однако, как показали результаты исследований, задача совместного распределения частотного и временного ресурсов имеет достаточно высокую вычислительную сложность [9, 10]. С целью уменьшения вычислительной сложности решаемой задачи при выделении радиоресурсов в нисходящем канале связи она может быть сформулирована как задача распределения частотного или временного ресурса.

**Анализ известных решений**

В работе были проанализированы методы распределения доступных ресурсов, использующие алгоритм Round Robin Scheduler [7, 11, 12]. Использование алгоритма Round Robin Scheduler предполагает выделение в равной степени доступного ресурса для каждой UE. В базовой реализации, Round Robin Scheduler выделяет каждой UE временной интервал, в рамках которого эта UE получает монополярный доступ к каналу. При этом скорость передачи данных UE ограничивается фактическим значением отношения сигнал/шум (signal to noise Ratio, SNR). Также были проанализированы методы [11, 12], использующие алгоритм Max C/I Ratio, который предоставляет доступный ресурс пользовательской станции с самыми лучшими значениями SNR, не обеспечивая справедливость распределения этого ресурса между UE. Кроме того, в работе проанализированы методы распределения доступных ресурсов, использующие алгоритм пропорционального справедливого распределения обслуживания (Proportional Fair Scheduling) [11 – 13]. Проведенный анализ показал, что алгоритм Proportional Fair Scheduling способствует UE, которая имеет высокое значение SNR, одновременно обеспечивая достаточное количество доступных ресурсов UE с худшим значением SNR.

Анализ показал, что наиболее приемлемым механизмом для предоставления доступа к радиоресурсам технологии LTE был бы механизм, включающий в себя особенности Round

Robin и Max C/I Ratio алгоритмов. Выбор алгоритма зависит от категории и величины нагрузки. Правильный выбор алгоритма для предоставления доступа особенно важен при большой нагрузке.

Также установлено, что использование алгоритма Proportional Fair Scheduling направлено на применение для интерактивного «best effort» класса данных во избежание ситуации, при которой некоторые UE никогда не получают доступ к радиоресурсу. Использование указанного класса обслуживания (Class of Service, CoS) обеспечивает доставку данных UE по мере возможностей без гарантий скорости передачи данных. Повышение качества обслуживания при планировании радиоресурса каждой UE должно быть направлено на обеспечение гарантированной скорости передачи с возможностью доступа к дополнительной (не гарантируемой) полосе пропускания. Однако ни один из проанализированных механизмов не способен обеспечить подобного CoS.

В результате анализа принято решение о необходимости разработки математической модели планирования частотно ресурса в нисходящем канале связи технологии LTE, сформулированной как задачи распределения подканалов, для обеспечения гарантированной скорости передачи UE.

### Математическая модель распределения ресурсных блоков в нисходящем канале

Предлагаемая математическая модель направлена на применение в беспроводных сетях технологии LTE, использующих частотное пропускной способности нисходящих каналов связи. При разработке математической модели учитывается тот факт, что наименьшей структурной единицей радиоресурса, которой можно управлять при решении задачи планирования является подканал.

С целью учета числа подкадров, выделенных для передачи информации в нисходящем канале связи [5, 6], в математическую модель введено понятие матрицы конфигураций нисходящего канала. Матрица является прямоугольной с количеством строк, соответствующим количеству конфигураций кадра  $L$ , и с количеством столбцов, соответствующим количеству подкадров  $M$  в кадре, т.е.

$$H = \|h_{l,m}\|, (l = \overline{0, L-1}; m = \overline{0, M-1}),$$

где  $h_{l,m} = \begin{cases} 1, & \text{если } m\text{-й подкадр при } l\text{-й конфигурации используется} \\ & \text{для передачи информации в нисходящем канале связи;} \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$

В ходе решения задачи распределения подканалов в рамках предлагаемой модели необходимо обеспечить расчет управляющей переменной  $x_{n,k}$ , определяющей порядок распределения блоков планирования. В соответствии с физикой решаемой задачи на управляющую переменную накладывается следующее ограничение:

$$0 \leq x_{n,k} \leq 1, \quad (1)$$

где  $k = \overline{0, K-1}$ ;  $n = \overline{1, N}$ ;  $K$  – число формируемых подканалов;  $N$  – количество UE.

При расчете искомым переменных  $x_{n,k}$  необходимо выполнить ряд важных условий-ограничений.

1. Условие выделения  $n$ -й пользовательской станции скорости передачи на  $k$ -м подканале, не превышающей пропускную способность подканала:

$$x_{n,k} \leq \frac{N_{\text{symp}}^{RB} N_{SF}^{RB} K_S R_C^{n,k} k_b^{n,k} \sum_{m=1}^M h_{l,m}}{T_F R_{\text{mpo}}^n}, \quad (2)$$

при ( $n = \overline{1, N}$ ;  $k = \overline{0, K-1}$ ;  $l = \overline{0, L-1}$ ;  $l$  – используемая конфигурация кадра), где  $K_S$  – число поднесущих для передачи данных на одном подканале,  $R_C^{n,k}$  – скорость кода, используемого при кодировании сигнала  $n$ -й UE на поднесущих  $k$ -го подканала,  $k_b^{n,k}$  – битовая загрузка OFDM-символа  $n$ -й UE на поднесущих  $k$ -го подканала,  $T_F = 10 \text{ мс}$  – время передачи одного кадра;  $N_{\text{symp}}^{RB}$  – количество символов, формирующих один ресурсный блок.

2. Удовлетворения требований по скорости передачи для каждой пользовательской станции в нисходящем канале связи при используемой схеме модуляции и кодирования (Modulation and Coding Scheme, MCS):

$$\sum_{k=1}^K x_{n,k} \geq 1 \quad (n = \overline{1, N}). \quad (3)$$

3. Условие закрепления подканала только за одной пользовательской станцией:

$$\sum_{k=1}^K x_{n,k} x_{s,k} = 0 \quad (n, s = \overline{1, N}, n \neq s). \quad (4)$$

Расчет искомым переменных (1) в соответствии с условиями-ограничениями (2) – (4) целесообразно осуществлять в ходе решения оптимизационной задачи, обеспечивая минимум или максимум предварительно выбранного критерия качества решения задачи распределения подканалов. Задача распределения подканалов может быть решена с использованием критерия оптимальности, направленного на максимизацию общей производительности нисходящего канала связи. Таким образом, критерий оптимальности примет вид

$$\max \sum_{k=0}^{K-1} \sum_{n=1}^N x_{n,k} \quad (5)$$

при учете условий-ограничений (2) – (4). Использование критерия оптимальности (5) совместно с условиями-ограничениями (2) – (4) направлено на обеспечение гарантированной скорости передачи с возможностью доступа к дополнительной (не гарантируемой) полосе пропускания, что в CoS соответствует подклассу В.

Сформулированная задача с математической точки зрения является задачей нелинейного программирования – NLP (NonLinear Programming). Переменная, используемая в критерии оптимальности (5), является нецелочисленной, ограничения на искомые переменные (2) и (3) носят линейный, а ограничения (4) – нелинейный характер.

### Анализ решений задачи распределения блоков планирования

С целью анализа решений по планированию ресурсных блоков в нисходящем канале связи, получаемых с использованием известных методов, а также предложенной модели (1) – (5) рассмотрим пример, при котором для распределения блоков планирования в нисходящем канале связи в качестве исходных данных были использованы следующие: количество UE –  $N=3$ ; количество подканалов, формируемых на протяжении передачи одного временного слота –  $K=15$ ; число поднесущих для передачи данных на одном подканале –  $K_S=12$ ; количество символов, формирующих один ресурсный блок –  $N_{\text{symp}}^{RB}=7$ ; время передачи одного кадра –  $T_F=10 \text{ мс}$ ; скорость кода, используемого при кодировании сигнала ( $R_C^{n,m}$ ) и битовая загрузка символа ( $k_b^{n,m}$ ) пользовательских станций на подканалах соответствуют эффективностям MCS сигналов, приведенным в таблице; вид разделения каналов – FDD.

На рис. 1 приведены значения эффективности MCS сигналов UE для различных ресурсных блоков

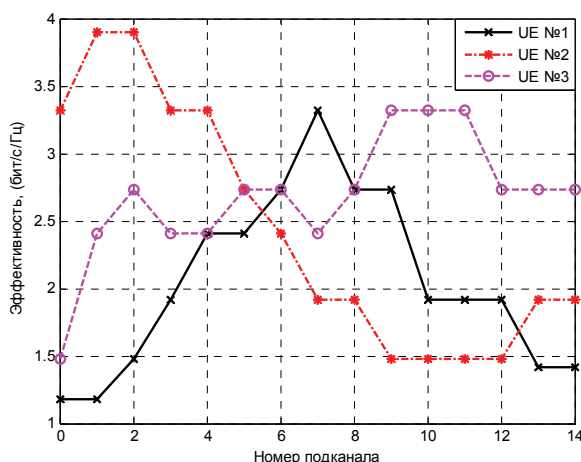


Рис. 1. Значения эффективности MCS сигналов UE для различных подканалов, используемых в примере

Эффективности MCS сигналов, соответствующие скоростям кода и битовым нагрузкам символов пользовательских станций

Номер подканала	Индекс CQI		
	UE №1	UE №2	UE №3
0	1,4766	3,9023	1,9141
1	2,4063	2,7305	1,9141
2	2,7305	3,3223	1,9141
3	2,4063	4,5234	1,9141
4	2,4063	3,9023	1,9141
5	2,7305	3,3223	1,4766
6	2,7305	1,9141	1,4766
7	2,4063	1,9141	1,4766
8	2,7305	2,4063	1,9141
9	3,3223	2,4063	2,4063
10	3,3223	2,4063	2,7305
11	3,3223	2,7305	2,7305
12	2,7305	2,4063	3,3223
13	2,7305	2,7305	3,9023
14	2,7305	3,3223	4,5234

В качестве примера было получено решение сформулированной в работе оптимизационной задачи с использованием системы MatLab R2012b. При этом была задействована программа `fmincon` пакета оптимизации Optimization Toolbox. Для примера всем пользовательским станциям были установлены одинаковые требуемые скорости передачи, которые принимали значения  $R_{trb}^n = 0 \div 0,25$  Мбит/с. На рис. 2 показано, как изменяется общая производительность нисходящего канала связи в зависимости от требуемой скорости передачи.

Как показали результаты моделирования (рис. 2), общая производительность нисходящего канала связи при использовании известных методов на протяжении всего интервала измерения не изменялась и составила для метода Round Robin – 0,655 Мбит/с, метода Proportional Fair – 0,67 Мбит/с, а для метода Max C/I Ratio – 0,865 Мбит/с. Общая производительность нисходящего канала связи при использовании предложенной модели (1) – (5) на участ-

ке  $R_{mpб}^n = 0 \div 0,19$  Мбит/с имела максимальное значение, соответствующее методу Max C/I Ratio и составляла 0,865 Мбит/с. На интервале  $R_{mpб}^n = 0,19 \div 0,25$  Мбит/с общая производительность уменьшалась на 5 % до значения 0,82 Мбит/с.

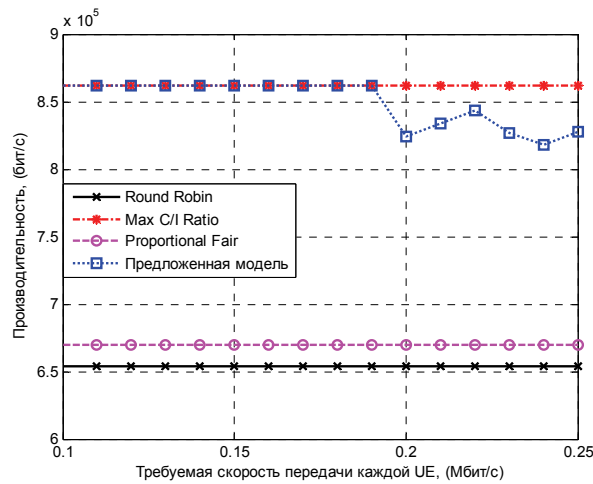


Рис. 2. Зависимость общей производительности нисходящего канала связи ввиду используемого метода распределения подканалов от требуемой скорости передачи

На рис. 3 приведены результаты моделирования, отображающие динамику изменения степени балансировки пропускной способности нисходящего канала между UE. Степень балансировки пропускной способности определялась в соответствии с выражением [14]

$$F^i = 1 - \left( \frac{\max R_n^i - \min R_n^i}{\sum_{n=1}^N R_n^i} \right),$$

где  $R_n^i$  – скорость передачи, выделенная  $n$ -й UE на  $i$ -м интервале измерения,  $n = \overline{1, N}$ .

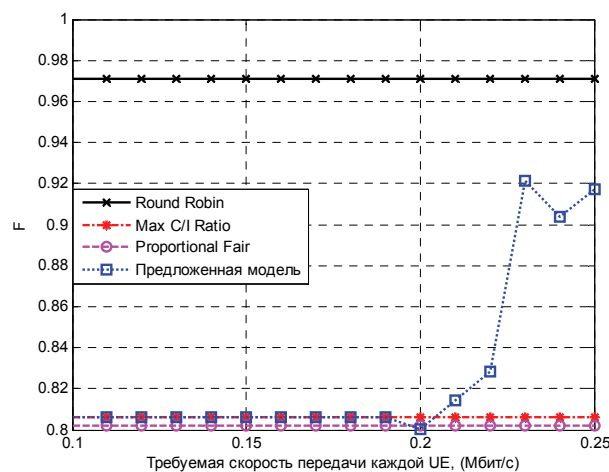


Рис. 3. Зависимость степени балансировки пропускной способности нисходящего канала связи ввиду используемого метода распределения подканалов от требуемой скорости передачи

Как показали результаты моделирования (рис. 3), степень балансировки пропускной способности нисходящего канала связи при использовании известных методов на протяжении всего интервала измерения не изменялась и составила для метода Round Robin – 0,97, для метода Proportional Fair – 0,802, а для метода Max C/I Ratio – 0,807. Степень балансировки пропускной способности нисходящего канала связи при использовании предложенной модели (1) – (5) на участке  $R_{tr\delta}^n = 0 \div 0,19$  Мбит/с имела значение, соответствующее методу Max C/I Ratio и составляла 0,807. На интервале  $R_{tr\delta}^n = 0,19 \div 0,25$  Мбит/с степень балансировки пропускной способности изменялась от 0,801 до 0,92.

На рис. 4 показано, как изменяются скорости передачи, выделенные той или иной UE в рамках используемого метода распределения подканалов нисходящего канала в зависимости от требуемой скорости передачи.

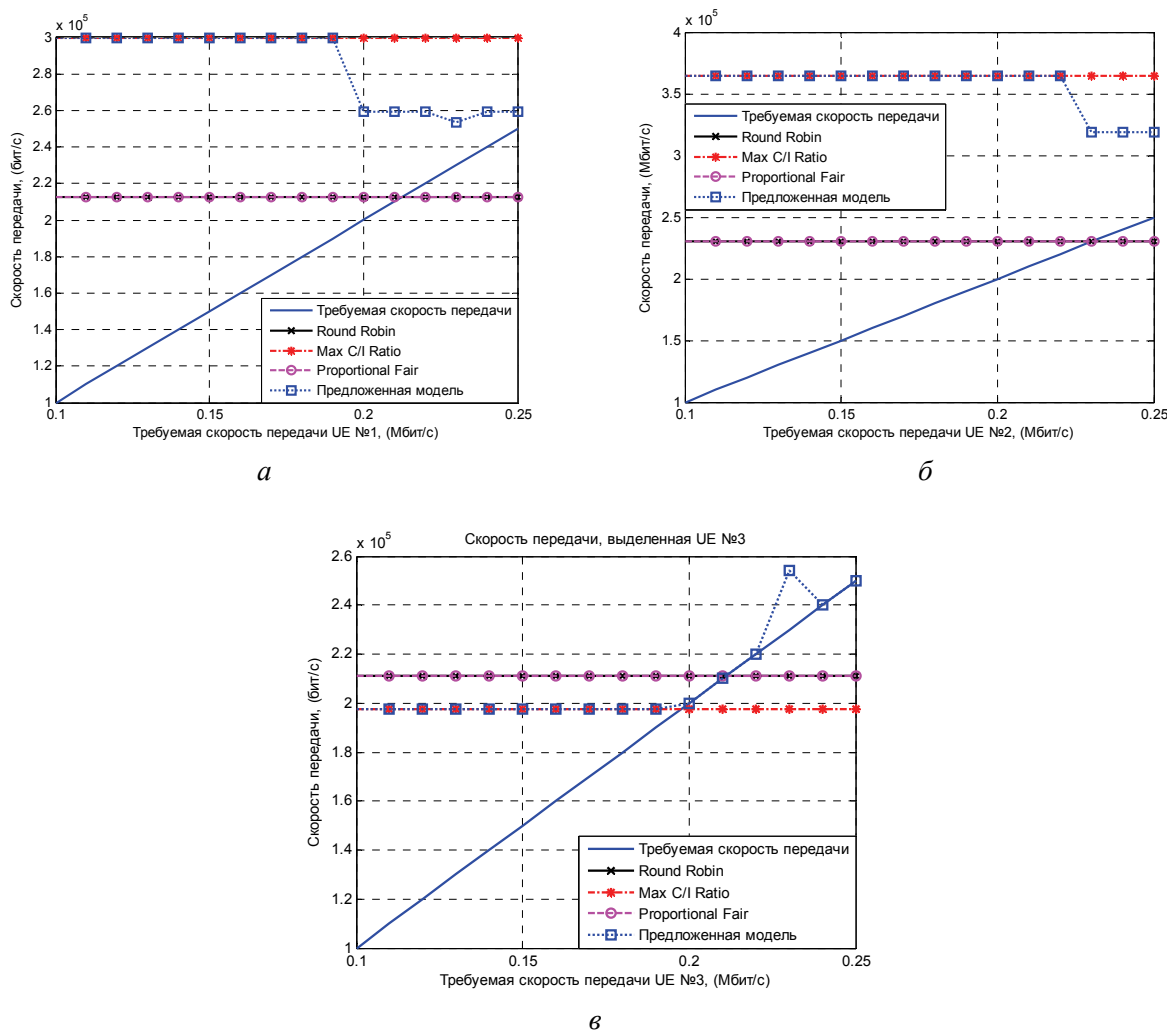


Рис. 4. Зависимость скорости передачи нисходящего канала связи пользовательских станций ввиду используемого метода распределения блоков планирования от требуемой скорости передачи

Как показали результаты моделирования (рис. 4), в условиях высоких требований к скорости передачи все рассмотренные известные методы не могут их выполнить для всех пользовательских станций. Выполнение требований по скорости передачи известными методами обеспечивается только при невысоких значениях  $R_{tr\delta}^n$ . Использование предложенной модели (1) – (5) обеспечивает выделение требуемой скорости передачи UE на всем интервале измерения  $R_{tr\delta}^n = 0 \div 0,25$  Мбит/с.

На рис. 5 приведены результаты расчета вероятности выполнения требований по скорости передачи, выделяемой всем UE. Вероятность выполнения требований по скорости передачи на  $i$ -м интервале измерения определялась в соответствии с выражением

$$P^i = \frac{\sum_{n=1}^N Q_n^i}{N},$$

где  $\sum_{n=1}^N Q_n^i$  – количество UE, которым выделена требуемая скорость передачи на  $i$ -м интервале измерения, т.е.  $Q_n^i = \begin{cases} 0, & \text{если } R_n^i < R_{trb}^i; \\ 1, & \text{если } R_n^i \geq R_{trb}^i. \end{cases}$

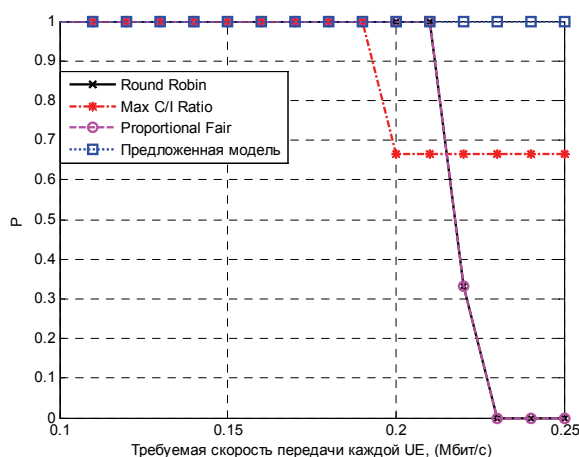


Рис. 5. Зависимость вероятности выделения UE требуемой скорости передачи ввиду используемого метода распределения подканалов от требуемой скорости передачи

## Выводы

Установлено, что одной из основных задач в беспроводной сети, функционирующей с использованием технологии LTE, является задача обеспечения требуемого качества обслуживания, в состав которой входит необходимость выделения пользовательским станциям сети необходимой скорости передачи в нисходящем канале связи. Также установлено, что одним из эффективных способов обеспечения требуемой скорости передачи в технологии LTE может быть достигнуто путем решения задачи распределения подканалов в нисходящем канале связи. В связи с этим, проанализированы существующие механизмы распределения радиоресурсов между пользовательскими станциями в нисходящем канале связи беспроводной сети, функционирующей с использованием технологии LTE.

На основании выявленных недостатков известных решений по распределению блоков планирования в нисходящем канале предложена математическая модель, представленная рядом линейных и нелинейных условий-ограничений. Новизна модели состоит в формулировке задачи распределения подканалов как задачи перераспределения доступной пропускной способности нисходящего канала технологии LTE для передачи информации в направлении пользовательских станций, при учёте их территориальной удаленности (вида системы модуляции и кодирования).

Отмечено, что сформулированная задача по распределению блоков планирования нисходящего канала с точки зрения физики процессов, протекающих в беспроводной сети, относится к классу задач балансировки частотных ресурсов – числа подканалов выделяемых пользовательским станциям, а с математической точки зрения – это задача нелинейного про-

граммирования. Сравнительный анализ показал, что наилучшие показатели по производительности нисходящего канала связи обеспечивает метод Max C/I Ratio, а также предложенная модель (1) – (5). С точки зрения сбалансированного распределения пропускной способности нисходящего канала связи, наилучшие показатели были у метода Round Robin, при условии низких требований к скорости передачи пользовательских станций. В условиях высоких требований к скорости передачи сбалансированное распределение пропускной способности нисходящего канала связи обеспечивает предложенная в статье модель (1) – (5).

Также анализ показал, что методы Max C/I Ratio, Round Robin и Proportional Fair эффективны лишь в условиях невысоких требований к скорости передачи (рис. 4 и 5). В условиях высоких требований к скорости передачи пользовательских станций эффективной оказалась модель (1) – (5), обеспечивая каждой пользовательской станции гарантированную скорость передачи с возможностью доступа к дополнительной (не гарантируемой) полосе пропускания, что в классах сервиса CoS соответствует подклассу В, тогда как другие методы не гарантируют выделения требуемой скорости передачи, что в классах сервиса CoS соответствует подклассу А.

**Список литературы:** 1. Лемешко, А.В., Гаркуша, С.В. Классификация методов распределения частотных каналов в многоинтерфейсных многоканальных mesh-сетях стандарта IEEE 802.11 // Проблемы телекоммуникаций. – 2011. – № 2 (4). – С. 139 – 149. – Режим доступа: [http://pt.journal.kh.ua/2011/2/1/112\\_lemeshko\\_classification.pdf](http://pt.journal.kh.ua/2011/2/1/112_lemeshko_classification.pdf). 2. Лемешко, А.В., Гоголева, М.А. Модель структурной самоорганизации многоканальной mesh-сети стандарта IEEE 802.11 // Проблемы телекоммуникаций. – 2010. – № 1 (1). – С. 83–95. – Режим доступа: [http://pt.journal.kh.ua/2010/1/1/101\\_lemeshko\\_mesh.pdf](http://pt.journal.kh.ua/2010/1/1/101_lemeshko_mesh.pdf). 3. Гаркуша, С.В. Разработка и анализ двухиндексной модели распределения частотных каналов в многоканальной mesh-сети стандарта IEEE 802.11 // Проблемы телекоммуникаций. – 2011. – № 3 (5). – С. 38 – 57. – Режим доступа: [http://pt.journal.kh.ua/2011/3/1/113\\_garkusha\\_mesh.pdf](http://pt.journal.kh.ua/2011/3/1/113_garkusha_mesh.pdf). 4. Гаркуша, С.В. Анализ результатов распределения частотных каналов в многоканальных многоинтерфейсных mesh-сетях стандарта IEEE 802.11 // Цифрові технології : Зб. наук. праць. – 2011. – Вып. 10. – С. 27-42. 5. 3GPP TS 36.211. 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical Channels and Modulation (Release 11). – Valbonne, France: Sophia Antipolis, 2012. – 108 p. 6. Ghosh, A., Zhang, J., Muhamed, R., Andrews, J. Cr. Fundamentals of LTE. – Prentice Hall, USA, 2010. – 464 p. 7. Iosif, O., Banica, I. On the Analysis of Packet Scheduling in Downlink 3GPP LTE System // The Fourth International Conference on Communication Theory, Reliability, and Quality of Service (CTRQ 2011). – 2011. – P. 99–102. 8. Dahlman, E., Parkvall, S., Skold, J., Beming, P. 3G Evolution – HSPA and LTE for Mobile Broadband. – Academic Press, 2008. – 608 p. 9. Гаркуша С.В., Василенко Ю.А. Модель планирования частотно-временного ресурса в нисходящем канале связи технологии LTE // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2013. – Вып. 3(85). – С. 92-98. 10. Гаркуша, С.В. Модель распределения блоков планирования в нисходящем канале связи технологии LTE // Грузинский электронный научный журнал : Компьютерные науки и телекоммуникации. – 2013. – Вып. 3(39). – С. 76-94. 11. Kawser, M.T., Farid, H.M.A.B., Hasin, A.R., Sadik, A.M.J., Razu, I.K. Performance Comparison between Round Robin and Proportional Fair Scheduling Methods for LTE // International Journal of Information and Electronics Engineering. – 2012. – V. 2. – № 5. – P. 678–681. 12. Galaviz, G., Covarrubias, D.H., Andrade, A.G., S. A resource block organization strategy for scheduling in carrier aggregated systems // EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking. – 2012. – P. 107–124. 13. Girici, T., Zhu, C., Agre, J.R., Ephremides, A. Proportional Fair Scheduling Algorithm in OFDMA-Based Wireless Systems with QoS Constraints // Journal of communications and networks. – 2010. – V. 12. – № 1. – P. 30–42. 14. Adibah, M.R.H., Kumbesan, S., Riyaj, B., Leijia, W. Modeling and simulation of packet scheduling in the downlink long term evolution system // Proceedings of 15th Asia-Pacific Conference on Communications (APCC 2009). – 2009. – P. 68–71.

Полтавский университет экономики и торговли

Поступила в редколлегию 11.01.2014