

# ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ СЕТИ И СИСТЕМЫ

УДК 621.391

О.Ю. ЕВСЕЕВА, д-р техн. наук, АЛЬ-АЗЗАВИ Эсса Мохаммед

## МОДЕЛЬ МАРШРУТИЗАЦИИ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КАНАЛЬНЫХ РЕСУРСОВ WIMAX MESH-СЕТИ

### Введение

Основным преимуществом беспроводных сетей WiMax (Worldwide Interoperability for Microwave Access) являются высокие скорости доступа, возможность предоставления услуг гарантированного качества и большие территории покрытия, что определяет WiMax как наиболее перспективную технологию радиодоступа на уровне городских сетей MAN (Metropolitan Area Network). Термин WiMax охватывает ряд стандартов IEEE семейства 802.16, отличающиеся используемым диапазоном частот, методами доступа, модуляции, кодирования и пр., а потому не совместимыми друг с другом. Принципиально сети WiMax могут быть разделены на сети фиксированной и мобильной связи, где первые регламентируются стандартом 802.16-2004 (802.16d), а вторые – стандартом 802.16-2005 (802.16e). В свою очередь, документ 802.16d предусматривает два режима. В режиме точка-многоточка (Point-to-Multipoint) основная роль в управлении трафиком и сетью в целом отводится базовой станции (Base Station, BS), функции которой аналогичны функциям базовой станции в сотовой системе связи (рис.1, а) [1]. В этом режиме весь трафик, как внешний, так и внутренний, проходит через BS. Однако с точки зрения эффективности использования канальных ресурсов и покрываемой территории бóльший интерес вызывает режим однорангового взаимодействия (mesh-mode), в рамках которого абонентские станции (Mesh Subscriber Station, MSS) одной сети могут взаимодействовать друг с другом без участия базовой станции (Mesh BS, MBS) (рис.1, б) [1]. В то же время реализация mesh-режима сопряжена с усложнением процесса управления такой сетью. Более того, стандартом 802.16d для сетей WiMax в режиме mesh определены лишь параметры физического и канального уровня, однако такие вопросы как организация сетевого и транспортного уровней, определение классов и их реализация остались не затронутыми. Тем не менее, потенциальный выигрыш, возможный в рамках mesh-сетей, обеспечивает интерес к перечисленным вопросам со стороны ученых всего мира, о чем свидетельствует множество публикаций на данную тему, например [2 – 10].

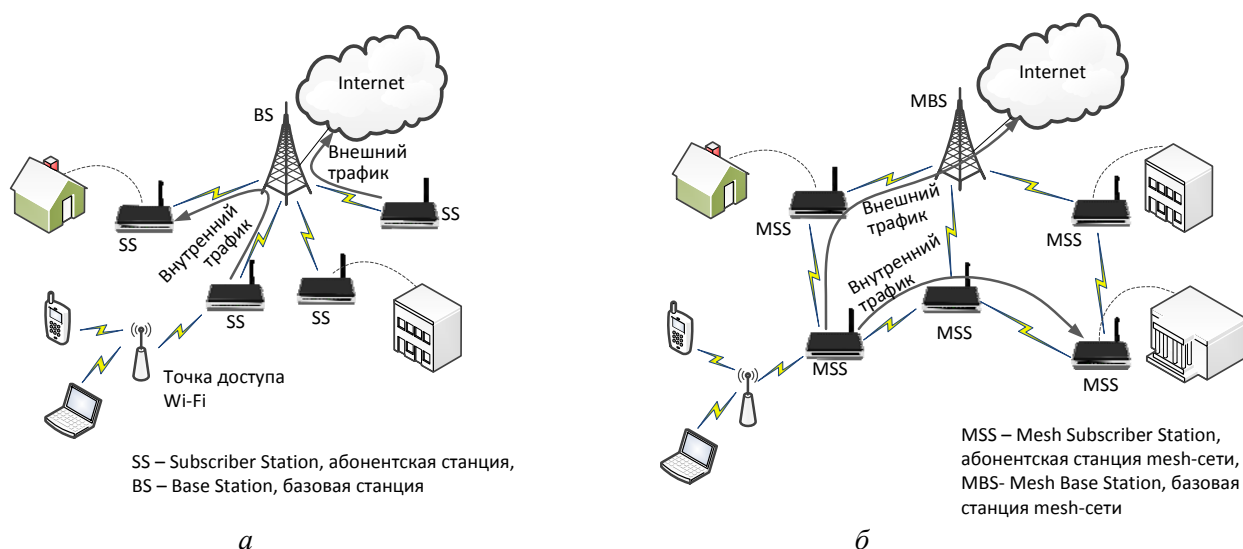


Рис. 1

Данная статья посвящена задачам сетевого уровня, основными из которых с точки зрения влияния на результирующее качество обслуживания пользователей и эффективность использования ресурсов беспроводной сети связи являются задачи маршрутизации. Как показывает анализ имеющихся наработок в области маршрутизации, не только в беспроводных, но и проводных сетях, традиционная постановка задачи, связанная с поиском одного или нескольких наилучших маршрутов, под влиянием общих тенденций развития телекоммуникаций трансформируется в более сложную задачу: для заданной пары адресатов необходимо определить один или несколько маршрутов, вдоль которых выполняются требования пользователей к качеству обслуживания [11]. В данном случае недостаточно просто определить маршрут, необходимо за каждым потоком вдоль всех задействованных маршрутов закрепить определенное количество ресурсов сети. Фактически задача маршрутизации трансформировалась в задачу распределения канальных ресурсов (cross-layered routing) [3 – 5, 8, 9].

### Особенности организации канального уровня WiMax-сети в режиме mesh

В области управления канальными ресурсами проводных сетей на данный момент накоплен существенный опыт, однако специфика организации канального уровня беспроводных сетей не позволяет перенести на них уже имеющиеся решения. В соответствии со стандартом 802.16d функционирование mesh-сети основывается на временном разделении абонентскими станциями общего радиоканала (Time Division Multiple Access, TDMA), где на физическом уровне с целью обеспечения высокой помехоустойчивости используется мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM). Упрощенная структура фрейма для mesh-сети стандарта 802.16d приведена на рис.2 [1].

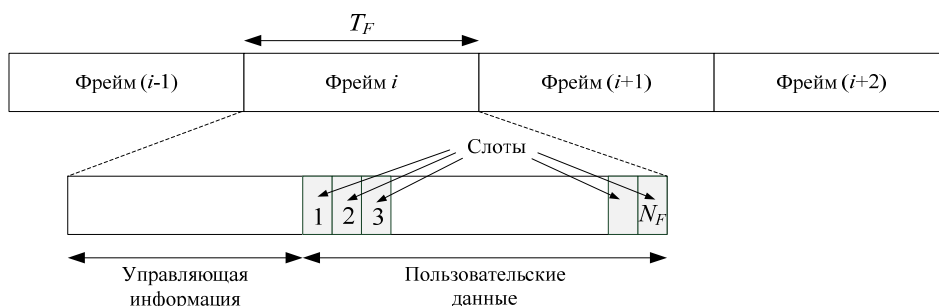


Рис. 2

Стандартом в качестве единичного ресурса канального уровня предусмотрен временной слот (minislot), содержащий следующее количество OFDM-символов [1]

$$\frac{N_{OFDM\_per\_frame} - N_{ctr\_slots} \times 7}{N_F},$$

где  $N_{OFDM\_per\_frame}$  – общее количество OFDM-символов во фрейме;  $N_{ctr\_slots}$  – параметр, определяемый стандартом как MSH\_CRTL\_LEN, указывающий на количество управляющих слотов во фрейме и назначаемый оператором связи;  $N_F$  – количество слотов в одном фрейме, используемых для передачи пользовательских данных.

Каждый фрейм содержит  $N_F$  слотов (максимально 256), каждый из которых способен «перенести» определенное количество байт пользовательского потока. Количество байт, передаваемых в одном слоте, зависит от общей длительности фрейма, от числа OFDM-символов в слоте, типа модуляции и схемы кодирования, выбор которых в свою очередь определяется помехово-сигнальной обстановкой на каждом конкретном участке. В таблице

приведено соответствие между числом информационных байт в одном OFDM-символе и типом модуляции [1]. Таким образом, длительность фреймов на канальном уровне WiMax mesh-сети фиксируется оператором связи, число OFDM-символов, приходящихся на один слот, а значит и количество байт в каждом из них известны. Тогда задача распределения канальных ресурсов представляет собой задачу назначения каждому потоку определенной совокупности временных слотов в рамках одного фрейма.

Тип модуляции	Скорость кодирования	Количество байт, передаваемых в одном OFDM-символе (uncoded block size)
BPSK	1/2	12
QPSK	1/2	24
QPSK	3/4	36
16QAM	1/2	48
16QAM	3/4	72
64QAM	2/3	96
64QAM	3/4	108

С точки зрения эффективности использования канальных ресурсов mesh-сети, важную роль играет возможность одновременного использования слотов разными станциями. Это возможно, если между станциями отсутствует первичная и вторичная интерференция, что гарантирует отсутствие воздействия этих станций друг на друга [3, 7]. Определим для каждой  $i$ -й станции множество узлов  $S_i^2$ , минимальное расстояние до которых в структуре mesh-сети не превышает 2 (2-hop neighborhood). По сути это множество, объединяет все узлы (абонентские станции), связанные первичной или вторичной интерференцией с рассматриваемой  $i$ -й станцией. Тогда если  $j$ -й временной слот используется  $i$ -й станцией, станция  $MSS_g$  имеет право использовать этот же слот только в том случае, если она не входит в множество  $S_i^2$ , т.е.  $MSS_g \notin S_i^2$ . На рис. 3 приведены примеры множеств  $S_1^2$  и  $S_3^2$ , построенные для станции  $MSS_1$  и  $MSS_3$  соответственно. Тогда один и тот же слот одновременно со станцией, например  $MSS_1$ , может использовать одна из станций  $MSS_6$ ,  $MSS_7$  или  $MSS_8$ .

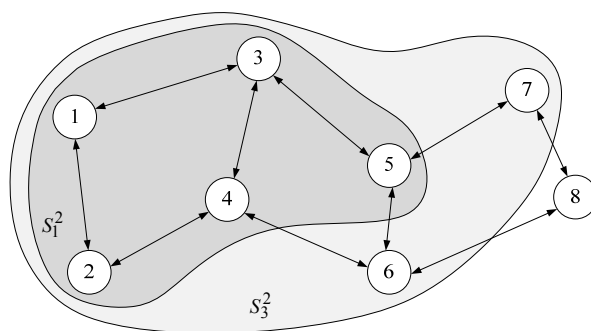


Рис. 3

### Особенности маршрутизации в WiMax mesh -сети

В соответствии с делением трафика на внутренний (Intranet), циркулирующий между абонентскими станциями внутри сети, и внешний (Internet), адресованный абонентам других сетей или поступающий от каких-либо внешних по отношению к данной сети источников, в mesh-сети существует два типа задач маршрутизации, как, впрочем, и задач распределения канальных ресурсов. Стандартом предполагается, что все задачи, связанные с управлением внутренним трафиком, решаются децентрализованно, на основании установления «соседских» отношений между смежными узлами [1]. Предложенные в литературе протоколы внутренней

маршрутизации, как правило, представляют собой разработки для мобильных ad-hoc-сетей (OLSR, DSDV, AODV, HWMP и др.), адаптированные в той или иной степени под специфику mesh-сетей [9, 10]. Фактически это разновидности дистанционно-векторных (distance-vector) протоколов или протоколов состояния канала (link state), основанные на комбинаторной задаче поиска кратчайшего пути и носящие эвристический характер. Принципиальные различия заключаются лишь в метриках, используемых для выбора наилучшего маршрута. Как правило, эти метрики отражают особенности беспроводной связи, например в [12] предложена маршрутная метрика EXC (Expected Forwarding Counter), формируемая на основании текущей оценки надежности и производительности беспроводного соединения на MAC-уровне.

Особенность маршрутизации внешнего трафика связана с тем, что функции шлюза, обеспечивающего соединение mesh-сети с другими сетями, в том числе и доступ к Internet-ресурсам, возлагаются на базовую станцию MBS, и весь внешний трафик проходит через нее. В этом случае задача маршрутизации сводится к построению дерева маршрутов с MBS в качестве корневой вершины, вдоль ветвей которого распределяются каналные ресурсы (слоты). Задача построения дерева маршрутов, как правило, формализуется в рамках теории графов в виде задачи о кратчайших путях, с той или иной метрикой. Например, в работе [6] предлагается в качестве метрики использовать эффективную пропускную способность каналов SWEB (Shortest-Widest Efficient Bandwidth), тогда критерием выбора маршрута  $P$  является наибольшее значение величины

$$SWEB = \frac{\min\{C_{i,j}(1 - p_{i,j}) \mid (i, j) \in P\}}{2h},$$

где  $C_{i,j}$  – пропускная способность канала  $(i, j)$ ,  $p_{i,j}$  – вероятность ошибок в канале;  $h$  – количество каналов  $(i, j)$ , задействованных в пути  $P$ .

В работе [8] в качестве критериев для формирования дерева маршрутов предложены минимум максимальной вершинной степени и максимум каналов (ветвей дерева), которые могут работать одновременно, не испытывая взаимной интерференции. Все перечисленные примеры иллюстрируют графокомбинаторный подход, в рамках которого решение маршрутной задачи основывается лишь на структурных свойствах mesh-сети. Однако в плане эффективности функционирования mesh-сети (количества обслуженных запросов, предоставленного качества обслуживания, эффективности использования сетевых ресурсов и пр.) более результативной оказывается потоковая постановка задачи, согласно которой маршрутные решения должны формироваться с учетом поступающих запросов пользователей [3, 11, 13].

Таким образом, с целью повышения эффективности функционирования WiMax mesh-сети задача маршрутизации как внутреннего, так и внешнего трафика должна, во-первых, решаться согласованно с задачей распределения временных слотов на канальном уровне, во-вторых, иметь под собой строгое математическое обоснование, позволяющее отказаться от эвристических процедур и находить наилучшее (оптимальное) для беспроводной сети в целом решение, где положенная в основу математическая модель должна носить потоковый характер.

### Математическая модель WiMax mesh -сети

Для описания структурных свойств сети будем использовать ориентированный взвешенный граф  $G(V, E)$ , множество вершин которого  $V$  моделирует множество всех узлов (станций) mesh-сети, включая MSS и MBS, а множество дуг  $E$  отражает совокупность каналов между ними, где наличие канала  $(i, j)$  означает возможность прямой передачи пользовательского потока от  $i$ -го узла к  $j$ -му. Помехово-сигнальная обстановка на отдельных участках сети определяет для каждого канала  $(i, j)$  свой тип модуляции и, как следствие, количе-

ство байт  $m_{i,j}$ , передаваемых в одном слоте. Поскольку именно слот является единичным ресурсом канального уровня, с целью управления процессом их распределения введем переменную

$$\tau_{i,j}^{r,l} = \begin{cases} 1, & \text{если } r\text{-й слот используется в канале } (i,j) \\ & \text{для передачи потока, адресованному } l\text{-му узлу;} \\ 0, & \text{в противном случае,} \end{cases} \quad (1)$$

$$(i,j) \in E, \quad r = \overline{1, N_F}, \quad l = \overline{1, N_V}, \quad l \neq i,$$

где  $N_V$  – общее количество узлов mesh-сети.

Тогда динамику очередей  $i$ -го узла mesh-сети можно описать так [4, 13]:

$$q_{i,j}(k+1) = q_{i,j}(k) - \sum_{\substack{v \in S_i^1, r \\ v \neq i}} m_{i,v}(k) \tau_{i,v}^{r,j}(k) n + \sum_{\substack{g \in S_i^1, r \\ g \neq i, j}} m_{g,i}(k) \tau_{g,i}^{r,j}(k) n + \xi_{i,j}(k) \Delta t, \quad (2)$$

где  $k=0, 1, 2, \dots$ ;  $\Delta t = t_{k+1} - t_k$  – интервал дискретизации (период перерасчета управляющих переменных  $\tau_{i,v}^{r,j}(k)$ );  $q_{i,j}(k)$  – объем данных, находящийся на  $i$ -м узле и предназначенный для передачи  $j$ -му узлу в момент времени  $t_k$ , трактуемый в дальнейшем как переменная состояния;  $S_i^1$  – множество узлов mesh-сети, смежных с  $i$ -м узлом;  $\xi_{i,j}(k)$  – интенсивность поступления данных на  $i$ -й узел в момент времени  $t_k$ , адресованных  $j$ -му узлу;  $n$  – количество фреймов, передаваемых в течение времени  $\Delta t$ ,  $n = \Delta t / T_F$ ;  $T_F$  – длительность одного фрейма.

Исходя из физического смысла введенных переменных на них накладываются следующие ограничения

$$q_{i,j}(k) \geq 0, \quad \sum_j q_{i,j}(k) \leq q_i^{\max}, \quad (3)$$

$$\sum_l \sum_{(i,j) \in E} \tau_{i,j}^{r,l}(k) \leq 1, \quad (4)$$

где  $q_i^{\max}$  – максимальный размер очереди, допустимый на  $i$ -й станции.

Условие (4) гарантирует, что  $r$ -й временной слот на  $k$ -м интервале дискретизации (управления) будет использован в системе лишь один раз. Если же в сети допускается повторное использование слотов, в выражении (4) суммирование по всем каналам сети  $(i,j) \in E$  следует заменить на суммирование по каналам в пределах множества  $S_i^2$ . Тогда условие (4) трансформируется в систему из  $N_V$  условий (по числу узлов в сети), где для  $i$ -й станции имеем

$$\sum_l \sum_{\substack{j, \\ j \neq i}} \tau_{i,j}^{r,l}(k) + \sum_l \sum_{\substack{(g,j), \\ g \in S_i^2}} \tau_{g,j}^{r,l}(k) \leq 1. \quad (5)$$

Уравнение состояния (2) может быть записано в векторно-матричной форме

$$\vec{q}(k+1) = \vec{q}(k) + M(k) \vec{r}(k) n + \vec{\xi}(k), \quad (6)$$

где  $\vec{q}(k) = [q_{1,2}(k), \dots, q_{i,j}(k), \dots, q_{N_v, N_v-1}(k)]^T$  – вектор состояния mesh-сети  $k$ -м интервале дискретизации размера  $N_v(N_v-1) \times 1$ , отражающий загруженность очередей на ее узлах;  $\vec{\tau}(k)$  – управляющий вектор размера  $N_F N_e(N_v-1) \times 1$ , элементами которого являются переменные  $\tau_{i,j}^{r,l}$ ;  $N_e$  – количество каналов в сети,  $N_e = |E|$ ;  $M(k)$  – матрица размера  $N_v(N_v-1) \times N_F N_e(N_v-1)$ , элементами которой являются величины  $m_{i,j}(k)$  на  $k$ -м интервале, взятые с учетом знака (+ или -) в выражении (2), и принцип формирования которой согласован с порядком элементов в  $\vec{\tau}(k)$ ;  $\vec{\xi}(k) = \Delta t [\xi_{1,2}(k), \dots, \xi_{i,j}(k), \dots, \xi_{N_v, N_v-1}(k)]^T$  – вектор пользовательской нагрузки размера  $N_v(N_v-1) \times 1$ , отражающий объем данных, которые поступают в сеть на  $k$ -м интервале.

Для решения задачи распределения временных слотов, обеспечивающую доставку пользовательских потоков конечным адресатам (маршрутизацию), в рамках приведенной модели введем в качестве целевой функции стоимостный функционал

$$J = \sum_{k=1}^a [\vec{q}^T(k) W_q \vec{q}(k) + \vec{\tau}^T(k) W_\tau \vec{\tau}(k)] \rightarrow \min, \quad (7)$$

где  $a$  – количество интервалов  $\Delta t$ , для которых осуществляется расчет управляющих переменных;  $W_q, W_\tau$  – диагональные неотрицательно определенные весовые матрицы.

В выражении (7) первое слагаемое нацеливает на минимизацию очередей на узлах mesh-сети путем доведения трафика конечным адресатам, а второе слагаемое требует минимизации используемых при этом канальных ресурсов (суммарного количества задействованных слотов). Учитывая специфику организации канального уровня mesh-сети стандарта 802.16, допускающую повторное использование слотов, выражение целевой функции может быть записано в виде

$$J = \sum_{k=1}^a [\vec{q}^T(k) W_q \vec{q}(k) + \vec{\tau}^T(k) W_\tau \vec{\tau}(k) - \vec{\tau}^T(k) W_{reuse} \vec{\tau}(k)] \rightarrow \min, \quad (8)$$

где  $W_{reuse}$  – диагональная неотрицательно определенная весовая матрица, отражающая выигрыш за счет повторного использования слотов.

Тогда, если первые два слагаемые в (8) связаны со «стоимостью» доставки трафика, третье слагаемое отражает «прибыль», получаемую за счет повторного использования слотов.

## Выводы

Таким образом, решение задачи маршрутизации совместно с распределением канальных ресурсов WiMax mesh-сети сводится к решению оптимизационной задачи по минимизации целевого функционала (8) при наличии динамических ограничений (6), а также ограничений на переменные состояния и управления (1), (3) и (5).

Основное отличие предложенной модели от ранее известных состоит в ее принадлежности к классу динамических моделей в пространстве состояний, что дает следующие преимущества:

- учет динамического характера поступающих на обслуживание пользовательских потоков и состояния самой сети, включая динамику структуры и сигнально-помеховой обстановки;
- возможность управления как канальными, так и буферными ресурсами сети;
- возможность применения для решения задачи маршрутизации и управления канальными ресурсами разработок в области теории оптимального управления, где уравнение поведения системы вида (2) занимает одно из центральных мест.

С точки зрения практической реализации, предложенная постановка задача потребует централизованного подхода в управлении mesh-сетью, что, в свою очередь, сопряжено с проблемой масштабируемости синтезируемых управляющих решений. Тогда, как дальнейшее направление развития предложенной модели видится кластеризация беспроводной сети с последующим применением иерархически-координационных методов управления ними.

**Список литературы:** 1. *IEEE Std 802.16-2004, IEEE Standard for Local and metropolitan area networks – Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access System.* IEEE, NY, 2004. 895 p. 2. *Hu H., Zhang Y., Chen H. An Effective QoS Differentiation Scheme for Wireless Mesh Networks // IEEE Network.* – 2008. – Vol.22(1). – P.66–73. 3. *Shou-Chih Lo, Lyu-Chen Ou Efficient routing and centralized scheduling algorithms for IEEE 802.16 mesh networks // International Journal of Network Management.* – 2011. – Vol. 21, Is. 6. – P. 494–512. 4. *Shetiya H., Sharma V. Algorithms for routing and centralized scheduling to provide QoS in IEEE 802.16 mesh networks // In Proceedings of the 1st ACM workshop on Wireless multimedia networking and performance modeling.* – 2005. – P. 140–149. 5. *El-Najjar J., Assi C., Jaumard B. Joint routing and scheduling in WiMAX-based mesh networks: A column generation approach // In Proceedings of IEEE International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks & Workshops.* – 2009. – P. 1–10. 6. *Tzu-Chieh, Chuan-Yin Wang Routing and admission control in 802.16 distributed mesh networks // In Proceedings of International Conference on Wireless and optical communication networks.* – 2007. – P. 1–5. 7. *Hung-Yu Wei, Ganguly S., Izmailov R., Haas Z.J. Interference-aware IEEE 802.16 WiMax mesh networks // In proc. IEEE Vehicular Technology Conference, VTC.* – 2005. – Vol. 5. – P. 3102 – 3106. 8. *Jin F., Arora A., Hwang J., Choi H.-A. Routing and Packet Scheduling for Throughput Maximization in IEEE 802.16 Mesh Networks // In Proceedings of the IEEE International Conference on Broadband Networks, September.* – 2007. – P. 574 – 582. 9. *He J., Fu X., Xiang J., Zhang Y., Tang Z. Routing and Scheduling for WiMAX Mesh Network // WiMAX Network Planning and Optimization.* – Auerbach Publications, 2009. – P. 222-243. 10. *Carvalho T., Jailton J., Valente W., Natalino C., Francês R., Lopes Dias K. A Mobile WiMAX Mesh Network with Routing Techniques and Quality of Service Mechanisms // Selected Topics in WiMAX, Edited by Gianni Pasolini. InTech, 2013. Available from: <http://www.intechopen.com/books/selected-topics-in-wimax/a-mobile-wimax-mesh-network-with-routing-techniques-and-quality-of-service-mechanisms>. 11. *Евсеева О.Ю., Гаркуша С.В. Обзор технологических и теоретических решений в области маршрутизации на основе качества обслуживания // Проблемы телекоммуникаций.* – 2012. – № 3 (8). – С. 24 – 46. Режим доступа: [http://pt.journal.kh.ua/2012/3/1/123\\_evseeva\\_review.pdf](http://pt.journal.kh.ua/2012/3/1/123_evseeva_review.pdf). 12. *Paris S., Nita-Rotaru C., Martignon F., Capone A. Cross-layer metrics for reliable routing in wireless mesh networks // IEEE/ACM Transactions on Networking.* – 2013. – Vol. 21, Is. 3. – P. 1003–1016. 13. *Поповский В.В., Лемешко А.В., Евсеева О.Ю. Математические модели телекоммуникационных систем. Ч. 1. Математические модели функциональных свойств телекоммуникационных систем // Проблемы телекоммуникаций.* – 2011. – № 2 (4). – С. 3 – 41. Режим доступа : [http://pt.journal.kh.ua/2011/2/1/112\\_popovsky\\_functional.pdf](http://pt.journal.kh.ua/2011/2/1/112_popovsky_functional.pdf).*

*Харьковский национальный  
университет радиоэлектроники,  
Одесская национальная академия связи  
им. А.С. Попова*

*Поступила в редколлегию 05.02.2014*