

МОДЕЛЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОДКАНАЛОВ В БЕСПРОВОДНОЙ MESH-СЕТИ СТАНДАРТА IEEE 802.16, ПРЕДСТАВЛЕННОЙ В ВИДЕ ГИПЕРГРАФА

Предложена топологическая модель mesh-сети стандарта IEEE 802.16, представленная с помощью гиперграфов и графов Кенига. При этом возможности гиперграфов использовались на этапе постановки задачи распределения подканалов с целью оценки характеристик исходных конфигураций mesh-сетей, а графы Кенига – при сравнительном анализе полученных результатов. Это позволило более полно и детально описать возможные конфигурации как всей mesh-сети в целом, так и отдельных ее элементов, представленных в виде вершин и ребер гиперграфа. Также впервые предложена математическая модель распределения частотного ресурса в mesh-сетях стандарта IEEE 802.16, новизна которой заключается, во-первых, в формулировке задачи распределения частотного ресурса как задачи распределения подканалов; во-вторых, в учете интерференции между станциями сети, что позволило расширить область использования предлагаемых решений.

Ключевые слова: гиперграф, математическая модель, WiMAX, распределение подканалов, производительность.

Введение

Появление экономически эффективных беспроводных mesh-сетей (Wireless Mesh Networks, WMN), основанных на технологии WiMAX [1-4], существенным образом изменило процесс организации как беспроводных сетей доступа, так и транспортных радиосетей. Использование режима mesh позволило пользовательским станциям (Subscriber stations, SS) обмениваться сообщениями не только через базовую станцию (Base Station, BS), но и непосредственно друг с другом. В результате этого SS, находящиеся на значительном расстоянии от BS, могут подключаться к ней путем нескольких переприемов через другие пользовательские станции.

Среди многих требований, выдвигаемых к беспроводным mesh-сетям (невысокая стоимость устройств, низкий уровень энергопотребления и т.д.), основным является обеспечение высокой производительности и качества обслуживания QoS беспроводной сети в целом. Исследования, направленные на повышение производительности mesh-сети, затрагивают протокольные средства технологических уровней эталонной модели взаимодействия открытых систем (Open Systems Interconnection Basic Reference Model, OSI). Высокий уровень производительности может быть обеспечен за счет усовершенствования соответствующих сетевых протоколов и механизмов, отвечающих за распределение доступных сетевых ресурсов. Кроме того,

использование режима множественного доступа с ортогональным частотным разделением (Orthogonal Frequency-Division Multiple Access, OFDMA) обеспечивает возможность управления частотным и временным ресурсами [3]. В качестве частотного ресурса могут выступать поднесущие и подканалы, в качестве временного ресурса – символы [2, 5-7]. В связи с этим возникает необходимость в анализе существующих и разработке новых подходов по распределению частотного ресурса, одновременно удовлетворяющих разнообразным требованиям качества обслуживания (Quality of Service, QoS) и условию повышения производительности mesh-сети в целом.

Анализ известных решений

Анализ известных решений, проведенный в [8] показал, что на сегодняшний день существует достаточно широкий спектр подходов, направленных на повышение производительности и обеспечение QoS путём решения задач распределения частотного ресурса. Важно понимать, что эффективность технологического решения задачи распределения частотного и временного ресурсов в mesh-сети технологии WiMAX во многом определяется полнотой учета требований при построении и функционировании WMN, описываемой математической моделью:

– учет неоднородности современных WMN, ввиду использования оборудования различных модификаций, серий и фирм-производителей;

- обеспечение эффективного использования частотного ресурса;

- ориентация на преимущественно динамический характер решения задачи распределения частотного ресурса;

- максимизация производительности сети в целом и на обеспечение других показателей QoS;

- использование распределенного или централизованного режима управления ресурсами;

- минимизация влияния первичной и вторичной интерференции между пользовательскими станциями WMN;

- согласованное решение задач выделения радиоканалов между mesh-станциями и закрепление за ними подканалов;

- ориентация на использование эффективных протоколов маршрутизации;

- учет технологических особенностей сети, таких как дальность связи, интенсивность поступления в сеть абонентского трафика, объем используемого частотного и временного ресурсов, количество поддерживаемых приемопередатчиков на станциях WMN, ширины канала, количества подканалов и т.п.

Результатом неполного их учета в математическом описании в большинстве случаев является усложнение реализующего протокола.

С целью устранения недостатков, присущих решению задачи распределения частотных каналов, задача частотного планирования может быть представлена в виде задачи распределения частотных подканалов в mesh-сети технологии WiMAX. На основании проведенного анализа, а также сформулированных требований, в работе предлагается модель распределения подканалов одного частотного канала. Предлагаемая математическая модель [8, 9] направлена на повышение производительности mesh-сети в целом путем балансировки числа подканалов, выделяемых отдельным пользовательским станциям. Это, в свою очередь, должно способствовать созданию беспроводной сети без «узких мест», т.е. участков с минимальной пропускной способностью.

Кроме того, в результате анализа известных решений по распределению частотных ресурсов [7, 10-17], все они базируются на использовании графового представления mesh-сети. Использование графового представления mesh-сети целесообразно в случае использования на mesh-станциях направленных антенн, т.к. между ними формируется радиоканал, который может быть представлен в виде ребра графа. Однако в случае использования на mesh-станциях ненаправленных антенн, графовое представление сети не обеспечивает адекватный учет их особенностей, ввиду формирования доменной структуры WMN.

Таким образом, при моделировании WMN необходимо использовать более эффективные, хотя, возможно, и более сложные, способы представления mesh-сети с использованием топологических идей [18, 19]. Для решения задач распределения частотных ресурсов в WMN хорошо себя зарекомендовал подход, основанный на гиперграфовом представлении mesh-сети [20-22]. Основными преимуществами гиперграфового представления WMN является:

- более полное и детальное описание возможной конфигурации как всей mesh-сети в целом, так и отдельных ее элементов представленных в виде вершин и ребер гиперграфа;

- приобретает новую формализацию задача определения связности. Нет необходимости производить поиск независимых путей между всеми парами вершин графа. При использовании гиперграфового подхода решение задачи связности сводится к поиску максимального числа станций, удаление которых приведет к делению mesh-сети на несколько несвязных компонент;

- использование гиперграфового подхода позволяет определить место той или иной станции в составе mesh-сети, в отличие от графового представления, которое произвольно «уравнивает» основные элементы системы.

Таким образом, при моделировании mesh-сетей технологии WiMAX будем использовать более эффективные способы представления mesh-сетей с использованием гиперграфов [23-25], позволяющие произвести теоретическое описание задачи распределения подканалов в mesh-сетей технологии WiMAX (далее WMN WiMAX).

Гиперграфовое представление топологии mesh-сети стандарта IEEE 802.16

В рамках исследования было использовано понятие зоны устойчивого приема, образующейся множеством SS и BS максимальной мощности, которые могут обмениваться информацией (пакетами). Под зоной устойчивого приема на графовом представлении WMN WiMAX понимается множество станций, имеющих связь «каждая с каждой» (рис. 1). На рис. 1 в качестве вершин графа выступают беспроводные mesh-станции, а ребер – радиоканалы, формируемые между парой станций.

На этапе постановки задачи распределения подканалов одного частотного канала WMN WiMAX каждой отдельной взятой SS и BS ставится в соответствие вершина $n_i \in I$ гиперграфа H . По аналогии, каждой отдельно взятой зоне устойчивого приема ставится в соответствие ребро $z_j \in J$ гиперграфа H . Предикат R , являясь инцидентором гиперграфа H , определяет принадлежит ли i -я

станция j -й зоне устойчивого приема. Таким образом, описание WMN WiMAX может быть произведено с использованием конечного гиперграфа $H = (I, J; R)$, состоящего из пары множеств вершин $I = \{n_i / i \in N\}$ и ребер $J = \{z_j / j \in Z\}$ вместе с двуместным предикатом $R \Leftrightarrow R(n_i, z_j)$, определенным для всех $n_i \in N$ и $z_j \in Z$. Исходя из этого, принадлежность i -й станции j -й зоне устойчивого приема определяется инцидентностью i -й вершины j -му ребру в гиперграфе H [23-25].

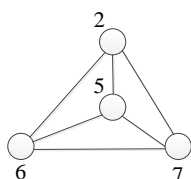


Рис. 1. Пример зоны устойчивого приема WMN WiMAX, формируемой множеством mesh-станций, имеющих связь «каждая с каждой»

В рамках гиперграфового описания WMN WiMAX формируется матрица зон устойчивого приема (TR-матрица) с помощью матрицы инцидентностей гиперграфа H

$$A(H) \doteq \|a_{z_j, n_i}\|, \quad (1)$$

где $a_{z_j, n_i} = \begin{cases} 1, & \text{если } i\text{-я станция входит в состав} \\ & j\text{-й TR, т.е. предикат } R(n_i, z_j) = 1; \\ 0, & \text{в противном случае,} \\ & \text{т.е. предикат } R(n_i, z_j) = 0. \end{cases}$

В качестве примера рассмотрим WMN WiMAX, представленную на рис. 2, состоящую из восьми станций, которые объединены в три зоны устойчивого приема. Указанной mesh-сети соответствует гиперграф $H = (I, J; R)$, изображенный на рис. 3, с множеством вершин $I = \{n_1, n_2, \dots, n_{12}\}$, множеством ребер $J = \{z_1, z_2, \dots, z_8\}$ и предикатом R , определяющим принадлежность той или иной станции к произвольной зоне устойчивого приема.

Для решения задачи распределения подканалов в WMN WiMAX предложено отнести гиперграфу $G(I, U; Q)$, моделирующему mesh-сеть в виде доменов коллизий, граф Кенига $K(G) = (I, U; Q)$ с множеством вершин $I \cup U$ [23-25]. Преобразовывая гиперграфовое представление возможной конфигурации WMN, mesh-сеть может быть представлена в виде плоского кенигового представления и в виде двудольного

ориентированного графа. Пример такого преобразования третьего домена коллизий, формируемого станциями №2 и №5-№7 (рис. 2), представлен на рис. 4.

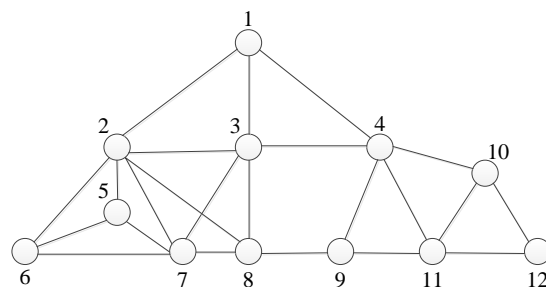


Рис. 2. Пример возможной конфигурации WMN WiMAX в виде графа

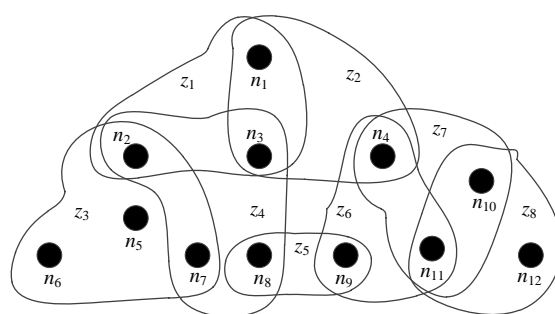


Рис. 3. Гиперграфовое представление WMN WiMAX, приведенной на рис. 2

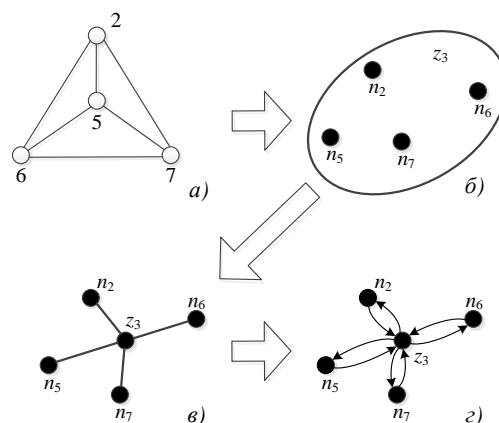


Рис. 4. Примеры представления возможной конфигурации домена коллизий WMN в виде графа (а) гиперграфа (б) плоского кенигового представления (в) и двудольного ориентированного графа (г)

Преобразовывая гиперграфовое представление возможной конфигурации WMN, mesh-сеть может быть представлена в виде плоского кенигового представления. При этом конфигурации WMN WiMAX (рис. 2) и ее гиперграфовому представлению (рис. 3) будет соответствовать плоское кенигово представление mesh-сети, представленное на рис. 5.

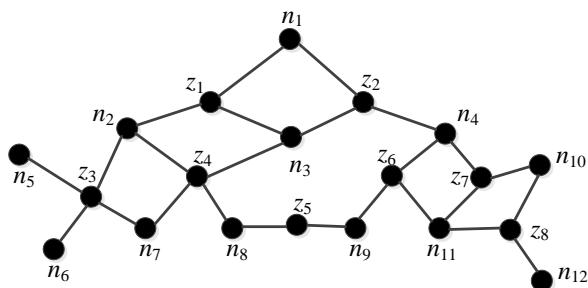


Рис. 5. Плоское кенигово представление возможной конфигурации WMN WiMAX

Формулировка функциональной математической модели распределения подканалов в WMN

Основываясь на плоском кениговом представлении WMN WiMAX (рис. 5), исходные данные задачи распределения подканалов будут представлены в виде:

1) $I = \{n_i, i = \overline{1, N}\}$ – множество станций, где N – их общее количество станций в mesh-сети;

2) $T = \{k_t, t = \overline{1, K}\}$ – множество подканалов, где k_t – элемент множества T , моделирующий t -й подканал, K – их общее количество в зависимости от используемой ширины частотного канала;

3) $J = \{z_j, j = \overline{1, Z}\}$ – множество зон устойчивого приема, где Z – общее количество зон устойчивого приема в mesh-сети;

4) $N(z_j) \doteq N_H(z_j) \doteq \{ n_i \in N / R(n_i, z_j) \}$ – станционный размер j -й зоны устойчивого приема mesh-сети, т.е. число станций, входящих в состав j -й TR.

С целью разработки математической модели распределения подканалов в WMN введем ряд условных обозначений (табл. 1), позволяющих графически отобразить элементы WMN WiMAX.

Таблица 1. Пример условных обозначений элементов WMN стандарта IEEE 802.16

Условное обозначение	Описание
n_1	Станция имеет первый порядковый номер в WMN
	Станция №1 участвует в формировании TR-1 и TR-2
	Станции №8 и №9 участвуют в формировании TR-5
	Станции №3, участвующей в формировании TR-2, выделены с первого по третий подканалы

В ходе решения задачи распределения подканалов станциям WMN WiMAX необходимо обеспечить расчет булевой управляющей переменной

$$x_{n_i, z_j}^{k_t} = \begin{cases} 1, & \text{если } t\text{-й подканал выделен } i\text{-й} \\ & \text{станции в } j\text{-й TR;} \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (2)$$

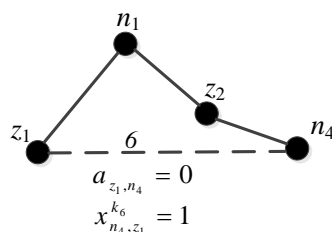
Общее количество переменных (2), которые определяют порядок распределения подканалов, зависит от количества станций в сети, формируемых зон устойчивого приема, используемых подканалов и, соответственно, будет определяться выражением $N \times Z \times K$. Результатом расчета переменных (2) должно быть закрепление подканалов за станциями WMN WiMAX. В связи с этим, при расчете искомым переменных $x_{n_i, z_j}^{k_t}$ необходимо выполнить ряд важных условий-ограничений:

1) Условие выделения подканалов mesh-станции только в рамках той зоны устойчивого приема, к которой она принадлежит (рис. 6):

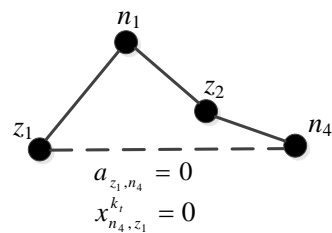
$$x_{n_i, z_j}^{k_t} \leq a_{z_j, n_i}, \quad (i = \overline{1, N}, j = \overline{1, Z}, t = \overline{1, K}). \quad (3)$$

2) Условие работы mesh-станции со станциями всех зон устойчивого приема, к которым она принадлежит, что позволит обеспечить высокий уровень связности mesh-сети (рис. 7):

$$\sum_{t=1}^K x_{n_i, z_j}^{k_t} \geq a_{z_j, n_i}, \quad (i = \overline{1, N}, j = \overline{1, Z}). \quad (4)$$

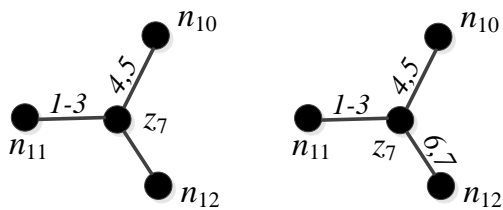


а) условие (3) не выполняется



б) условие (3) выполняется

Рис. 6. Пример проверки условия выделения подканалов i -й станции, если она участвует в формировании j -й зоны устойчивого приема

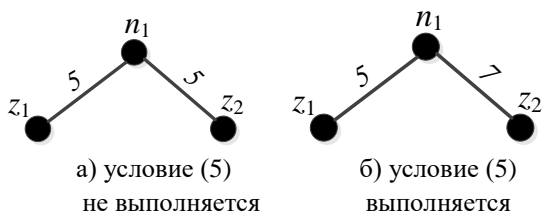


а) условие (4) не выполняется
б) условие (4) выполняется

Рис. 7. Пример проверки условия выделения подканалов всем станциям в каждой зоне устойчивого приема

3) Условие того, что mesh-станция не должна работать на одном и том же подканале одновременно с несколькими станциями (рис. 8):

$$\sum_{j=1}^Z a_{z_j, n_i} x_{n_i, z_j}^{k_t} \leq 1, \quad (i = \overline{1, N}, t = \overline{1, K}). \quad (5)$$

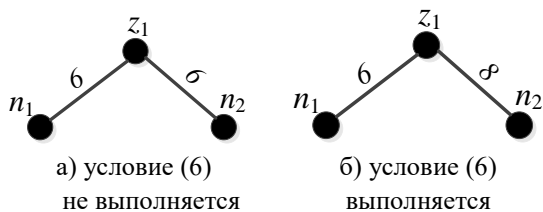


а) условие (5) не выполняется
б) условие (5) выполняется

Рис. 8. Пример проверки условия того, что станция не работает на одном подканале одновременно с несколькими станциями

4) Условие предотвращения первичной интерференции (рис. 9), т.е. i -я mesh-станция может производить передачу информации на t -ом подканале только одной станции:

$$\sum_{i=1}^N a_{z_j, n_i} x_{n_i, z_j}^{k_t} \leq 1 \quad (j = \overline{1, Z}, t = \overline{1, K}). \quad (6)$$



а) условие (6) не выполняется
б) условие (6) выполняется

Рис. 9. Пример проверки условия отсутствия первичной интерференции

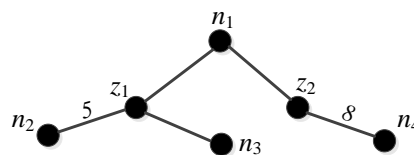
5) Условие предотвращения вторичной интерференции (рис. 10), т.е. mesh-станции, находящиеся в одной зоне устойчивого приема, не должны передавать информацию i -й станцией с использованием одного и того же подканала:

$$\sum_{j=1}^Z \left(a_{z_j, n_i} \sum_{\substack{r=1 \\ r \neq i}}^N \left(a_{z_j, n_r} x_{n_r, z_j}^{k_t} \right) \right) \leq 1, \quad (7)$$

при $t = \overline{1, K}, i = \overline{1, N}$.



а) условие (7) не выполняется



б) условие (7) выполняется

Рис. 10. Пример проверки условия отсутствия вторичной интерференции

6) Условие балансировки числа подканалов, выделяемых каждой станцией:

$$\sum_{t=1}^K x_{n_i, z_j}^{k_t} \geq \chi \quad (i = \overline{1, N}, j = \overline{1, Z}), \quad (8)$$

где в левой части неравенства представлено число подканалов, выделенных i -й станции в j -й TR, χ – нижний динамически управляемый порог числа подканалов, выделенных произвольно выбранной станции WMN WiMAX.

В рамках предложенной математической модели (2)-(8) решение оптимизационной задачи распределения подканалов в WMN WiMAX может производиться с использованием следующего критерия:

$$\max_{x, \alpha} \chi, \quad (9)$$

направленного на повышение производительности mesh-сети в целом путем увеличения производительности каждой mesh-станции. Использование целевой функции (9) способствует созданию беспроводной сети без «узких мест», т.е. сети, в которой производительности всех соединений являются сбалансированными по своей величине [26]. Основным преимуществом решения, получаемого с использованием целевой функции (9), является возможность маршрутизации пакетов данных в mesh-сети с использованием метрики минимального количества переприемов, что упростит функции маршрутизации в WMN WiMAX.

Сформулированная задача с точки зрения физики процессов, протекающих в WMN, относится к классу задач балансировки канальных ресурсов – взвешенного числа подканалов, выделяемых радиоканалам, а с математической точки зрения – это задача смешанного целочисленного линейного программирования – MILP. В модели искомые переменные $x_{n_i, z_j}^{k_t}$ (2) являются булевыми, минимизируемая переменная χ является целочисленной, а ограничения на искомые переменные носят линейный характер.

Выводы

Предложена топологическая модель mesh-сети стандарта IEEE 802.16, представленная с помощью гиперграфов и графов Кенига. При этом возможности гиперграфов использовались на этапе постановки задачи распределения подканалов с целью оценки характеристик исходных конфигураций mesh-сетей, а графы Кенига – при сравнительном анализе полученных результатов. Это позволило более полно и детально описать возможные конфигурации как всей mesh-сети в целом, так и отдельных ее элементов, представленных в виде вершин и ребер гиперграфа.

На основе предложенной топологической модели разработана функциональная модель распределения частотного ресурса в mesh-сетях стандарта IEEE 802.16, новизна которой заключается, во-первых, в формулировке задачи распределения частотного ресурса как задачи распределения подканалов; во-вторых, в учете интерференции между станциями сети, что позволило расширить область использования предлагаемых решений. Математический аппарат гиперграфов используется на этапе постановки задачи распределения подканалов с целью оценки характеристик исходных конфигураций mesh-сетей, а математический аппарат графов Кенига – при сравнительном анализе результатов ее решения. В рамках предложенной модели в качестве критерия оптимальности предлагается максимизировать нижний динамически управляемый порог числа подканалов, выделяемых каждой пользовательской станции в каждой зоне устойчивого приема, т.е. минимального количества подканалов, выделенных любому радиоканалу. Кроме того, в классе оптимизационных задач предложенная модель сформулирована как задача смешанного целочисленного линейного программирования (MILP).

Список литературы

1. Andrews J. G., Ghosh A., Muhamed R. *Fundamentals of WiMAX Understanding Broadband Wireless Networking*.

Prentice Hall Communications Engineering and Emerging Technologies Series, 2007. 449 p.

2. *IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks: Part 16: Air Interface for Broadband Wireless Access Systems, IEEE Std 802.16-2009*. – 2009. – 2094 p.

3. Nuaymi L. *WiMAX: Technology for Broadband Wireless Access*. John Wiley, Chichester, England, 2007. 310 p.

4. Kapoor A., Ribeiro V.J. *An end to end QoS aware greedy distributed scheduling framework for WiMAX mesh networks // Proc. of the Second International Conference on Communication System and Networks (COMSNETS)*, 2010. P. 1-8.

5. Гаркуша С. В. *Разработка и анализ масштабируемой модели распределения подканалов в сети стандарта IEEE 802.16 / С. В. Гаркуша // Збірник наукових праць Харківського університету повітряних сил*. – 2012. – Вип. 4 (33). – С. 68–74.

6. Лемешко А. В. *Разработка и анализ двухиндексной модели распределения частотных каналов в многоканальных mesh-сетях стандарта IEEE 802.11 / А.В.Лемешко, С. В. Гаркуша, Ахмед Х. Абед // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии : 22-я международная крымская конференция : материалы конференции, Севастополь, Крым, Украина. 10–14 сентября 2012 г. Т. 1 : тезисы докл.* – Севастополь, 2012. – С. 273–274.

7. Wei H.-Y., Rykowski J., Dixit S. *WiFi, WiMAX and LTE Multi-hop Mesh Networks: Basic Communication Protocols and Application Areas*. Wiley, 2013. 280 p.

8. Гаркуша С. В. *Модель сбалансированного распределения подканалов в mesh-сети, использующей технологию WiMAX / С. В. Гаркуша, Ахмед Хассан Абед, Е. В. Гаркуша // Системи обробки інформації : зб.наукових праць*. – 2013. – Вип. 9 (116). – С. 135–140.

9. Garkusha S. *Model of Distribution of Frequency Resource in the WiMAX Mesh-Network / S. Garkusha, H. Al-Janabi, A. Al-Dulaimi // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science : proceedings of the XII International Conference (TCSET'2014), Slavske, Ukraine. February 25 – March 1, 2014*. – Lviv, 2014. – P. 507–509.

10. Jain S., Tripathi V. S., Tiwari S. *Bandwidth Allocation Based on Traffic Load and Interference in IEEE 802.16 Mesh Networks // Journal of Engineering*. Hindawi Publishing Corporation, 2013. Vol. 2013. P. 1-7.

11. Du P., Jia W., Huang L., Lu W. *Centralized scheduling and channel assignment in multi-channel single-transceiver WiMAX mesh network // Proceedings of Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, 2007. P. 1734-1739.

12. Liao W.-H., Kedia S. P., Dubey A. K. *Scheduling and channel assignment algorithm for IEEE 802.16 mesh networks using clique partitioning technique // Journal Computer Communications*, 2012. Vol. 35 Iss. 16. P. 2025-2034.

13. Du P., Jia W., Huang L., Lu W. *Centralized Scheduling and Channel Assignment in Multi-Channel Single-Transceiver WiMax Mesh Network // Proc. of IEEE Wireless Communications & Networking Conference (WCNC'07)*, 2007. pp. 1734-1739.

14. Tang Y., Yao Y., Lin X. *A joint centralized scheduling and channel assignment scheme in WiMax mesh networks // Proceedings of the International Conference on Wireless Communications and Mobile Computing: Connecting the World Wirelessly*, 2009. P. 552-556.

15. Wang S. C., Yan K. Q., Wang C. H. *A Channel Allocation based WiMax Topology // Proceedings of the*

International MultiConference of Engineers and Computer Scientists, 2009. Vol I. P. 299-304.

16. Tang Y.-L., Cheng R.-S., Wu T.-Y., Yu J.-P. *On Centralized Scheduling and Channel Assignment Scheme for WiMAX Mesh Networks // Journal of Internet Technology, 2009. Vol. 10, №3. P. 207-215.*

17. Tang Y., Yao Y., Yu J. *Novel Joint Centralized Scheduling and Channel Assignment Scheme for IEEE 802.16 Mesh Networks // Proc. of 4th International Conference on Computer Science & Education, 2009. P. 289-293.*

18. Гаркуша С. В. *Модель распределения блоков планирования в нисходящем канале связи технологии LTE / С. В. Гаркуша // Грузинский электронный научный журнал : Компьютерные науки и телекоммуникации. – 2013. – Вып. 3 (39). – С. 76–94.*

19. Гаркуша С. В. *Модель распределения слотов и формирования пакетов данных в нисходящем канале связи технологии WiMAX / С. В. Гаркуша // Вестник Сибирского государственного университета телекоммуникаций и информатики. – 2014. – Вып. 2. – С. 3–18.*

20. Лемешко А. В. *Потоковая модель маршрутизации с учетом потерь пакетов на узлах телекоммуникационной сети / А. В. Лемешко, О. Ю. Евсеева, С. В. Гаркуша // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2013. – № 2. – С. 52–60.*

21. Лемешко О. В. *Модель превентивного обмеження швидкості передачі низхідного каналу зв'язку технології WiMAX в умовах перевантажень / О. В. Лемешко, С. В. Гаркуша // Вісник національного університету «Львівська політехніка» : Радіоелектроніка та телекомунікації. – 2013. – № 766. – С. 132–138.*

22. Гаркуша С. В. *Модель распределения пропускной способности нисходящего канала связи технологии WiMAX с ограничением скорости передачи / С. В. Гаркуша // Инфокоммуникационные технологии. – 2013. – Т. 11, № 3. – С. 18–23.*

23. Зыков А. А. *Гиперграфы // Успехи математических наук. – № 6 (180) – 1974. – С. 86-154.*

24. Berge C. *Graphs and Hypergraphs. – New York: Elsevier, 1973. – 528 p.*

25. Berge C. *Hypergraphs: The Theory of Finite Sets. – Amsterdam, Netherlands: North-Holland, 1989. – 256 p.*

26. Лемешко А. В., Вавенко Т. В. *Усовершенствование потоковой модели многопутевой маршрутизации на основе балансировки нагрузки [Электронный ресурс] // Проблемы телекоммуникаций. – 2012. – № 1 (6). – С. 12–29. – Режим доступа до журн.: http://pt.journal.kh.ua/2012/1/1/121_lemeshko_multipath.pdf.*

Поступила в редколлегию

Рецензент: д.т.н., проф. Лемешко А.В., Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков.

ГАРКУША Сергей Владимирович

Полтавский университет экономики и торговли, Полтава, доктор технических наук, доцент, доцент кафедры документоведения и информационной деятельности в экономических системах.

Раб. тел. – (05322) 2-16-71, E-mail – sv.garkusha@mail.ru.

ГАРКУША Елена Владимировна

Полтавский университет экономики и торговли, Полтава, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры документоведения и информационной деятельности в экономических системах.

Раб. тел. – (05322) 2-16-71, E-mail – av.garkusha@mail.ru.

ЕРЕМЕНКО Александра Сергеевна

Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры телекоммуникационных систем.