

# Кібернетика та системний аналіз

УДК 621.391

С.В. Гаркуша<sup>1</sup>, Е.В. Гаркуша<sup>1</sup>, А.С. Еременко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Полтавський університет економіки і торгівлі, Полтава, Україна

<sup>2</sup>Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

## 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 переключений 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 инцидентом 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].

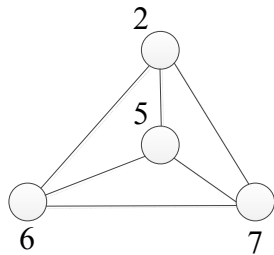


Рис. 1. Пример зоны устойчивого приема WMN WiMAX, формируемой множеством mesh-станций, имеющих связь «каждая с каждой»

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

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

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.

мируемого станциями №2 и №5-№7 (рис. 2), представлен на рис. 4.

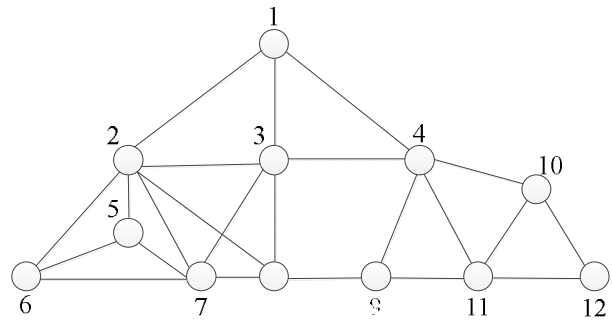


Рис. 2. Пример возможной конфигурации WMN WiMAX в виде графа

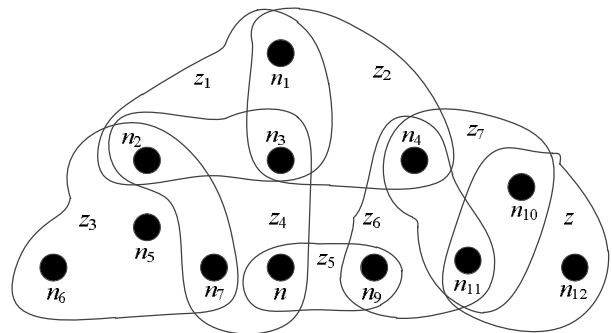


Рис. 3. Гиперграфовое представление WMN WiMAX, приведенной на рис. 2

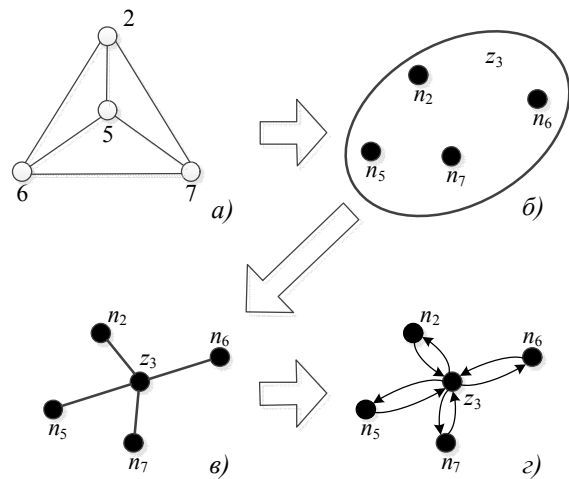


Рис. 4. Примеры представления возможной конфигурации домена коллизий WMN в виде графа (а) гиперграфа (б) плоского кенигового представления (в) и двудольного ориентированного графа (г)

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.

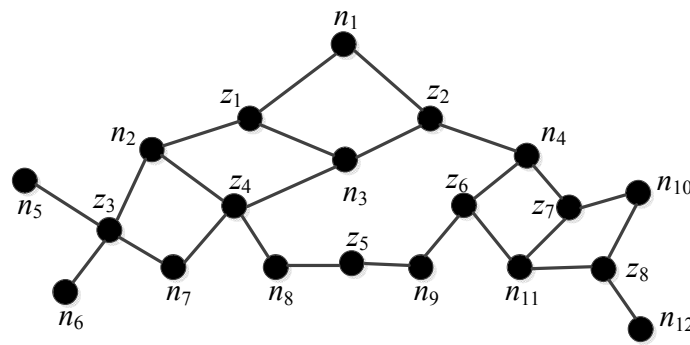


Рис. 5. Плоское кенигово представление возможной конфигурации WMN WiMAX

### Формулировка функциональной математической модели распределения подканалов в WMN

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
	Станция №3, участвующей в формировании TR-2, выделены с 1-го по 3-й подканалы

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.

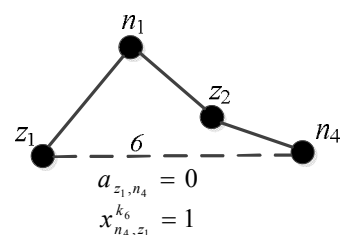
В ходе решения задачи распределения подканалов станциям WMN WiMAX необходимо обеспечить расчет булевой управляющей переменной

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

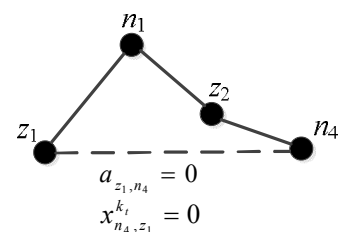
Общее количество переменных (2), которые определяют порядок распределения подканалов, зависит от количества станций в сети, формируемых зон устойчивого приема, используемых подканалов и, соответственно, будет определяться выражением  $N \times Z \times K$ . Результатом расчета переменных (2) должно быть 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):



а – условие (3) не выполняется



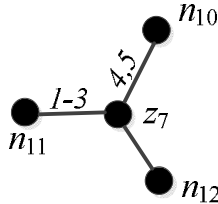
б – условие (3) выполняется

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

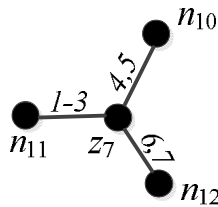
$$x_{n_i, z_j}^{k_t} \leq a_{z_j, n_i}, \quad (i = \overline{1, N}, j = \overline{1, Z}, t = \overline{1, K}). \quad (3)$$

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 (4) не выполняется

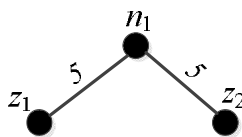


б – условие (4) выполняется

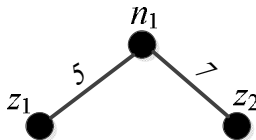
Рис. 7. Пример проверки условия выделения подканалов всем станциям в каждой зоне устойчивого приема

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

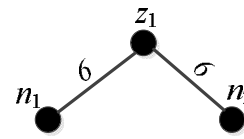


б – условие (5) выполняется

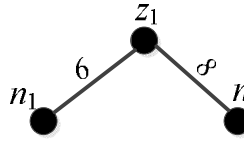
Рис. 8. Пример проверки условия того, что станция не работает на одном подканале одновременно с несколькими станциями

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



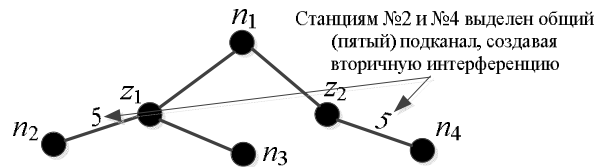
б – условие (6) выполняется

Рис. 9. Пример проверки условия отсутствия первичной интерференции

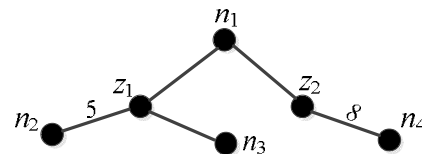
5. Условие предотвращения вторичной интерференции (рис. 10), т.е. mesh-станции, находящиеся в одной зоне устойчивого приема, не должны передавать информацию  $i$ -й станцией с использованием одного и того же подканала:

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

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 станции:

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

где в левой части неравенства представлено число подканалов, выделенных  $i$ -й станции в  $j$ -й TR,  $\chi$  – 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  $x_{n_i, z_j}^{k_t}$  (выражение 2) являются булевыми, минимизируемая переменная  $\chi$  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 масштабированной 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 конф.: 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. наук. 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 Int. 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. Потокковая 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 нисхідного 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 [Електронний ресурс] // *Проблеми телекомунікацій*. – 2012. – № 1 (6). – С. 12–29. – Режим доступу до журн.: [http://pt.journal.kh.ua/2012/1/1/121\\_lemeshko\\_multipath.pdf](http://pt.journal.kh.ua/2012/1/1/121_lemeshko_multipath.pdf).

Поступила в редколлегию 17.03.2015

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. А.В. Лемешко, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков.

### МОДЕЛЬ РОЗПОДІЛУ ПІДКАНАЛІВ В БЕЗПРОВОДОВІЙ MESH-МЕРЕЖІ СТАНДАРТУ IEEE 802.16, ПРЕДСТАВЛЕНІ У ВИГЛЯДІ ГІПЕРГРАФУ

С.В. Гаркуша, О.В. Гаркуша, О.С. Єременко

Запропонована топологічна модель mesh-мережі стандарту IEEE 802.16, представлена за допомогою гіперграфів і графів Кьоніга. При цьому можливості гіперграфів використовувалися на етапі постановки задачі розподілу підканалів з метою оцінки характеристик вихідних конфігурацій mesh-мереж, а графи Кеніга – при порівняльному аналізі отриманих результатів. Це дозволило більш повно і детально описати можливі конфігурації як всієї mesh-мережі в цілому, так і окремих її елементів, представлених у вигляді вершин і ребер гіперграфу. Також вперше запропонована математична модель розподілу частотного ресурсу в mesh-мережах стандарту IEEE 802.16, новизна якої полягає у формулюванні задачі розподілу частотного ресурсу як задачі розподілу підканалів, а також в обліку інтерференції між станціями мережі, що дозволило розширити область використання запропонованих рішень.

**Ключові слова:** гіперграф, математична модель, WiMAX, розподіл підканалів, продуктивність.

### SUBCHANNEL ALLOCATION MODEL IN WIRELESS MESH-NETWORK BASED ON IEEE 802.16 STANDARD FORMED BY HYPERGRAPH

S.V. Garkusha, O.V. Garkusha, O.S. Yeremenko

Topological model of mesh-network standard IEEE 802.16 using hypergraphs and Konig graphs were proposed. Hypergraphs used at the stage of the problem statement of subchannel allocation in order to assess the characteristics of the initial mesh-networks configurations, and Konig graphs used for comparative analysis of the results. This allowed a more complete and detailed describing of possible mesh-network configurations as a whole and its individual elements represented by nodes and edges of hypergraph. Also at the first time a mathematical model of frequency resource allocation in mesh-network standard IEEE 802.16 was proposed, the novelty of which is, firstly, in the formulation of the problem of frequency resource allocation as problem of subchannel allocation; secondly, in the account of interference between network stations, thereby expanding the scope of use of the proposed solutions.

**Keywords:** hypergraph, mathematical model, WiMAX, subchannel allocation, performance.