

Інфокомунікаційні системи

УДК 621.391

С.В. Гаркуша¹, Ахмед Хассан Абед¹, Е.В. Гаркуша²

¹ Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

² Полтавський університет економіки і торгівлі, Полтава, Україна

МОДЕЛЬ СБАЛАНСИРОВАННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОДКАНАЛОВ В MESH-СЕТИ, ИСПОЛЬЗУЮЩЕЙ ТЕХНОЛОГИЮ WiMAX

Проанализированы существующие подходы к решению задачи распределения частотного ресурса в беспроводных mesh-сетях технологии WiMAX, на основе недостатков которых сформулированы требования системного характера к структуре и содержанию математической модели распределения частотного ресурса. Предложена математическая модель распределения частотного ресурса как задачи балансировки числа подканалов между радиоканалами, формируемыми mesh-станциями беспроводной сети. Использование предложенной модели позволило повысить производительность беспроводной mesh-сети в целом, а также гарантировать отсутствие «узких мест». Рост производительности mesh-сети также обусловливался гарантией отсутствия первичной и вторичной интерференции.

Ключевые слова: математическая модель, mesh-сеть, WiMAX, балансировка, распределение частотного ресурса, производительность.

Введение

Появление экономически эффективных беспроводных mesh-сетей (Wireless Mesh Networks, WMN), основанных на технологии WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) [1-4], существенным образом изменило процесс организации как беспроводных сетей доступа, так и транспортных радиосетей.

Использование режима mesh позволило пользователям станциям (Subscriber Station, 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 SS.

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 (Quality of Service, 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, OSI). Высокий уровень производительности может быть обеспечен за счет усовершенствования соответствующих сетевых протоколов и механизмов, отвечающих за распределение доступных сетевых ресурсов. К подобного рода ресурсам,

прежде всего, относятся сетевой трафик (информационный ресурс), пропускные способности каналов связи (канальный ресурс), очереди (буферный ресурс), а также отдельные частоты или частотные каналы (частотный ресурс), что особенно важно для беспроводных сетей. Кроме того, использование режима OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) обеспечивает возможность управления частотным и временным ресурсом [5]. В качестве частотного ресурса могут выступать поднесущие, являющиеся первичной структурной единицей OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing), а также подканалы, являющиеся наименьшей логической структурой OFDMA в частотной области и формирующиеся несколькими поднесущими. В качестве временного ресурса технологии OFDMA выступают символы, являющиеся наименьшей структурной единицей OFDM во временной области [3, 6 – 8]. В связи с этим возникает необходимость в анализе существующих и разработке новых подходов по распределению частотного ресурса, одновременно удовлетворяющих разнообразным требованиям QoS и условию повышения производительности mesh-сети в целом.

Анализ требований, выдвигаемых к моделям и методам распределения частотного ресурса в mesh-сетях технологии WiMAX

Анализ известных решений [9 – 16] показал, что на сегодняшний день существует достаточно широкий спектр подходов, направленных на повы-

шение производительности и обеспечение QoS путём решения задач распределения частотного ресурса. В работах [9 – 16] приведены варианты решения задачи распределения частотного ресурса в WMN технологии WiMAX как задачи распределения частотных каналов. Недостатком формулировки задачи распределения частотного ресурса, как задачи распределения частотных каналов, является необходимость использования на каждой SS, во-первых, нескольких приемопередатчиков с целью устранения первичной интерференции, а во-вторых, достаточно большого количества частотных каналов с целью устранения вторичной интерференции между соседними SS. Первичная интерференция возникает в случае, когда пользовательская станция осуществляет информационный обмен одновременно с несколькими пользовательскими станциями на одном и том же частотном канале [10, 11]. Причиной вторичной интерференции является попытка использования одного и того же частотного ресурса различными парами пользовательских станций в зоне действия принимающей пользовательской станции [10, 11]. При этом использование нескольких приемопередатчиков повысит сложность и стоимость пользовательских станций, а также потребует дополнительного расхода электроэнергии. С другой стороны, использование достаточно большого количества частотных каналов не всегда является доступным, ввиду загруженности частотного диапазона, используемого для функционирования технологии WiMAX.

Необходимо констатировать, что адекватность и эффективность решения задачи распределения частотного ресурса с использованием того или иного метода очень часто определяется математической моделью, положенной в его основу. В результате анализа известных решений [9 – 16], а также требований, приведенных в [7, 17 – 19], были сформулированы требования к структуре и содержанию математической модели распределения частотного ресурса в mesh-сети технологии WiMAX:

- 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 режим 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 простых 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 частотного канала, количества подканалов и т.п.

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. 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 статье предлагается модель распределения подканалов одного частотного канала. Предлагаемая математическая модель направлена на повышение производительности mesh-сети в целом, путем балансировки числа подканалов, выделяемых отдельным радиоканалам. Это, в свою очередь, должно способствовать созданию беспроводной сети без «узких мест», т.е. участков с минимальной пропускной способностью.

Математическая модель распределения подканалов в беспроводной mesh-сети технологии WiMAX

В предлагаемой модели предполагаются известными следующие исходные данные:

- 1) N – общее количество станций в сети (базовая и пользовательские станции);
- 2) K – количество используемых подканалов;
- 3) M – общее количество радиоканалов, формируемых в сети. Под радиоканалом будем понимать набор из двух произвольных mesh-станций беспроводной сети, ведущих информационный обмен без переприемов.

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

Таблица 1

Пример условных обозначений элементов mesh-сети

Условное обозначение	Описание
	Базовая станция имеет первый порядковый номер в сети
	Пользовательская станция имеет четвертый порядковый номер
	Пользовательские станции №4 и №5 образуют радиоканал №2
	Радиоканалу №2 выделены с третьего по шестой, а также одиннадцатый подканалы

В математической модели введено понятие матрицы радиоканалов, позволяющей производить учет территориальной удаленности WMN в сети. Матрица радиоканалов является прямоугольной, количество строк и столбцов которой соответствует общему числу радиоканалов M , и имеет вид

$$D = \|d_{m,s}\|, (s, m = \overline{1, M}),$$

где

$$d_{m,s} = \begin{cases} 1, & \text{если в формировании } m\text{-го и } s\text{-го} \\ & \text{радиоканала участвует общая станция;} \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

На рис. 1 приведен пример WMN с указанием числа станций ($N = 8$), а также радиоканалов, формируемых этими станциями ($M = 11$).

Mesh-сети, приведенной на рис. 1, соответствует следующая матрица радиоканалов:

$$D = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}.$$

В рамках данной работы с целью указания топологических и функциональных параметров возможной конфигурации WMN будет использовано обозначение $N|M|K$. Таким образом, обозначение возможной конфигурации WMN, представленной на рис. 1, примет вид $8|11|32$.

В рамках предлагаемой модели в ходе решения задачи распределения подканалов пользовательским станциям сети необходимо обеспечить расчет булевой управляющей переменной

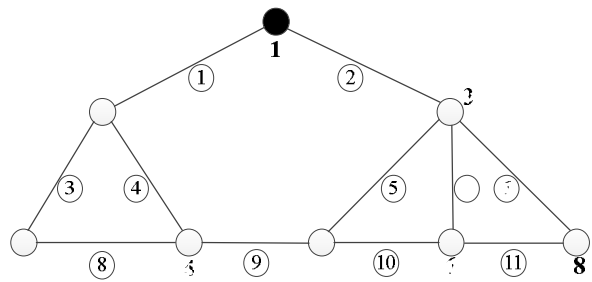


Рис. 1. Пример mesh-сети с указанием станций $N = 8$ и радиоканалов $M = 11$

$$x_{m,k} = \begin{cases} 1, & \text{если } k\text{-й подканал выделен } m\text{-му} \\ & \text{радиоканалу;} \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (1)$$

Общее количество переменных (1), которые определяют порядок распределения подканалов, зависит от количества формируемых радиоканалов в сети, используемых подканалов и, соответственно, будет определяться выражением $M \times K$. Результатом расчета переменных (1) должно быть закрепление подканалов за радиоканалами. В связи с этим, при расчете искомым переменных $x_{m,k}$ необходимо выполнить ряд важных условий-ограничений:

1. Условие использования каждого радиоканала (рис. 2):

$$\sum_{k=1}^K x_{m,k} \geq 1 \quad (m = \overline{1, M}). \quad (2)$$

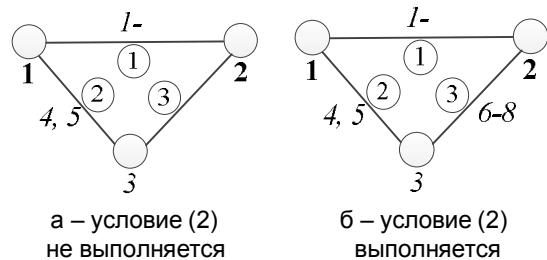


Рис. 2. Пример проверки условия использования каждого радиоканала

2. Условие предотвращения первичной и вторичной интерференции (рис. 3 и 4):

$$x_{m,k} + \sum_{s=1}^M d_{m,s} x_{s,k} \leq 1, \quad (3)$$

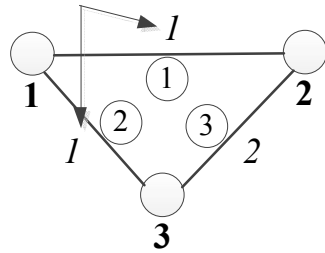
при $k = \overline{1, K}$, $m = \overline{1, M}$, $s \neq m$.

3. Условие балансировки числа подканалов, выделяемых каждому радиоканалу:

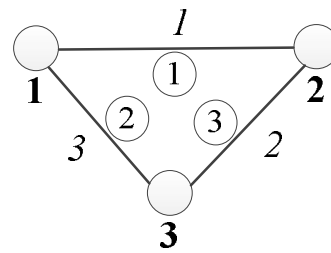
$$\sum_{k=1}^K x_{m,k} \geq \chi \quad (m = \overline{1, M}), \quad (4)$$

где в левой части неравенства представлено число подканалов выделенных m -му радиоканалу, χ – верхний динамически управляемый порог числа подканалов выделенных произвольно выбранному радиоканалу WMN.

Радиоканалы №1 и №2 одновременно используют одинаковый (первый) подканал



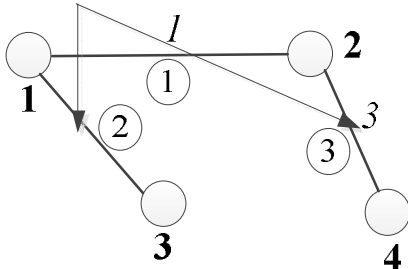
а – условие (3) не выполняется



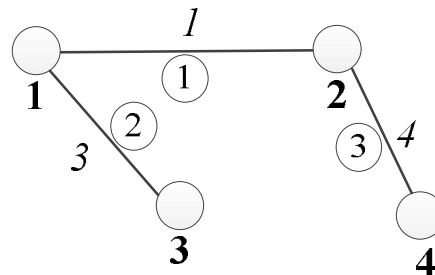
б – условие (3) выполняется

Рис. 3. Пример проверки условия отсутствия первичной интерференции

Радиоканалы №2 и №3 используют общий (третий) подканал, создавая вторичную интерференцию



а – условие (3) не выполняется



б – условие (3) выполняется

Рис. 4. Пример проверки условия отсутствия вторичной интерференции

В рамках предложенной математической модели (1) – (4) решение оптимизационной задачи может производиться с использованием следующего критерия:

$$\max_{x, \alpha} \chi, \quad (5)$$

направленного на повышение производительности mesh-сети в целом, путем увеличения производительности каждого радиоканала. Использование целевой функции (5) способствует созданию беспроводной сети без «узких мест», т.е. сети, в которой производительности всех соединений являются сбалансированными [20]. Основным преимуществом решения, получаемого с использованием целевой функции (5), является возможность маршрутизации пакетов данных в mesh-сети с использованием метрики минимального количества переприемов, что значительно упростит функции маршрутизации в WMN.

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 (Mixed Integer Linear Programming). В модели искомые переменные $x_{m,k}$ (1) являются булевыми, минимизируемая переменная χ

является целочисленной, а ограничения на искомые переменные носят линейный характер.

Пример решения задачи распределения подканалов в WMN технологии WiMAX

С целью оценки качества получаемых решений по распределению каналов в рамках предложенной модели рассмотрим пример решения поставленной задачи. В примере рассматривалась mesh-сеть 8|11|32, представленная на рис. 1. В рамках приведенного примера каждая пользовательская станция использовала следующие исходные данные:

используемый подрежим OFDMA – DL FUSC;
 количество поднесущих для передачи данных на один подканал – $K_s = 48$;

частотный разнос между поднесущими – $\Delta f \approx 11,16$ КГц;

уровень модуляции (битовая загрузка символа) – $k_b = 4$;

скорость кода используемого при кодировании сигнала – $R_c = 1/2$;

вид модуляции сигнала – 16-QAM 1/2.

Результат решения задачи с указанием исходных радиоканалов и порядка распределения подканалов приведен на рис. 5.

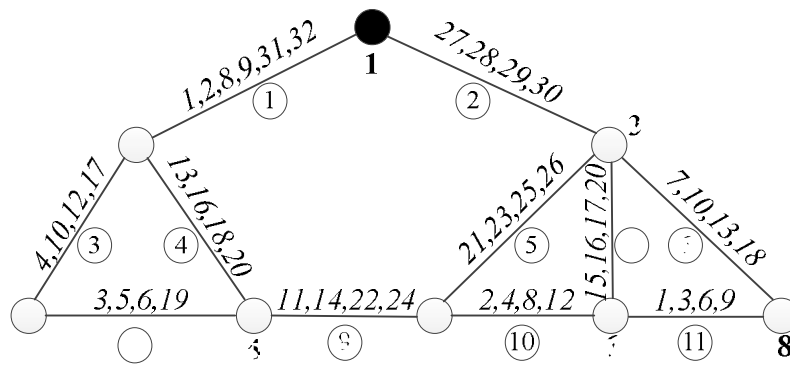


Рис. 5. Пример распределения подканалов в ходе решения задачи структурной самоорганизации в mesh-сети технологии WiMAX

Как видно из полученного результата (рис. 5), при решении распределения подканалов в mesh-сети 8|11|32 с использованием предложенной модели (1) – (5) каждому радиоканалу выделялось не меньше четырех подканалов ($\chi = 4$), в результате чего пропускная способность всех радиоканалов была не ниже 4,19 Мбит/с. Кроме того, радиоканалу №1 было выделено шесть подканалов, что соответствует скорости передачи 6,28 Мбит/с. В результате анализа полученного решения можно сделать вывод, что использование модели (1) – (5) направлено на справедливое распределение подканалов между радиоканалами mesh-сети технологии WiMAX.

Выводы

Установлено, что одной из основных задач в WMN технологии WiMAX является задача распределения частотного и временного ресурсов между станциями сети. В связи с этим проанализированы существующие подходы к решению задачи распределения частотного ресурса в WMN технологии WiMAX. На основе недостатков проанализированных методов распределения частотного ресурса в WMN были сформулированы требования системного характера, направленные на устранение выявленных недостатков, и подразумевающие разработку математической модели распределения частотного ресурса, представленного в виде логических подканалов.

На основании сформулированных требований, выдвигаемых к перспективным решениям в области распределения частотного и временного ресурсов в WMN, предложена математическая модель, представленная рядом линейных условий-ограничений. Новизна модели состоит в формулировке задачи распределения частотного ресурса как задачи балансировки числа подканалов между радиоканалами, формируемыми mesh-станциями беспроводной сети, что позволило повысить производительность WMN в целом, а также гарантировать отсутствие в mesh-сети «узких мест». Это в свою очередь позволит при

необходимости производить маршрутизацию пакетов данных в mesh-сети с использованием метрики минимального количества переприемов. Рост производительности mesh-сети также обусловливался гарантией отсутствия первичной и вторичной интерференции, что достигалось благодаря специально введенному в структуру модели условию (3).

Отмечено, что сформулированная задача по распределению подканалов в WMN технологии WiMAX с точки зрения физики процессов, протекающих в беспроводной сети, относится к классу задач балансировки частотных ресурсов – числа подканалов используемых радиоканалом, а с математической точки зрения – это задача смешанного целочисленного линейного программирования. В качестве инструментальных средств при решении сформулированной в работе оптимизационной задачи была использована система MatLab R2012b, в рамках которой действовала программа milpassign пакета оптимизации TOMLAB.

Список литературы

1. Andrews J.G. *Fundamentals of WiMAX Understanding Broadband Wireless Networking* / J.G. Andrews, A. Ghosh, R. Muhamed. – Prentice Hall Communications Engineering and Emerging Technologies Series, 2007. – 449 p.
2. Nuaymi L. *WiMAX: Technology for Broadband Wireless Access* / L. Nuaymi. – John Wiley, Chichester, England, 2007. – 310 p.
3. *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.
4. Kapoor A. *An end to end QoS aware greedy distributed scheduling framework for WiMAX mesh networks* / A. Kapoor, V.J. Ribeiro // *Proc. of the Second International Conference on Communication System and Networks (COMSNETS)*. – 2010. – P. 1-8.
5. *802.16j IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks: Part 16: Air Interface for Broadband Wireless Access Systems. Amendment 1: Multihop Relay Specification, IEEE Std 802.16j-2009*. – 2009. – 290 p.
6. 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. – X.: ХУ ПС, 2012. – Bun. 4(33). – С. 68-74.*

7. Гаркуша С.В. Разработка и анализ модели распределения подканалов в сети стандарта IEEE 802.16 / С.В. Гаркуша // Вісник національного університету «Львівська політехніка»: Радіоелектроніка та телекомунікації. – 2012. – № 738. – С. 177-185.

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

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

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

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

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

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

14. Wang S.C. A Channel Allocation based WiMax Topology / S.C. Wang, K.Q. Yan, C.H. Wang // Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists. – 2009. – Vol. I. – P. 299-304.

15. Tang Y.-L. On Centralized Scheduling and Channel Assignment Scheme for WiMAX Mesh Networks / Y.-L. Tang,

R.-S. Cheng, T.-Y. Wu, J.-P. Yu // Journal of Internet Technology. – 2009. – Vol. 10, №3. – P. 207-215.

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

17. Лемешко А.В. Модель структурной самоорганизации многоканальной MESH-сети стандарта IEEE 802.11 [Электронный ресурс] / А.В. Лемешко, М.А. Гоголева // Проблеми телекомунікацій. – 2010. – № 1 (1). – С. 83-95. – Режим доступа к журналу: http://pt.journal.kh.ua/2010/1/1/101_lemeshko_mesh.pdf.

18. Гаркуша С.В. Разработка и анализ двухиндексной модели распределения частотных каналов в многоканальной mesh-сети стандарта IEEE 802.11 [Электронный ресурс] // Проблеми телекомунікацій. – 2011. – № 3 (5). – С. 38-57. – Режим доступа к журналу: http://pt.journal.kh.ua/2011/3/1/113_garkusha_mesh.pdf.

19. Лемешко А.В. Классификация методов распределения частотных каналов в многоинтерфейсных многоканальных mesh-сетях стандарта IEEE 802.11 [Электронный ресурс] / А.В. Лемешко, С.В. Гаркуша // Проблеми телекомунікацій. – 2011. – № 2 (4). – С. 139-149. – Режим доступа к журналу: http://pt.journal.kh.ua/2011/2/1/112_lemeshko_classification.pdf.

20. Лемешко А.В. Усовершенствование потоковой модели многопутевой маршрутизации на основе балансировки нагрузки [Электронный ресурс] / А.В. Лемешко, Т.В. Вавенко // Проблеми телекомунікацій. – 2012. – № 1 (6). – С. 12-29. – Режим доступа к журналу: http://pt.journal.kh.ua/2012/1/1/121_lemeshko_multipath.pdf.

Поступила в редколлегию 21.10.2013

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

МОДЕЛЬ ЗБАЛАНСОВАНОГО РОЗПОДІЛУ ПІДКАНАЛІВ У MESH-МЕРЕЖІ, ЩО ВИКОРИСТОВУЄ ТЕХНОЛОГІЮ WIMAX

С.В. Гаркуша, Ахмед Хассан Абед, О.В. Гаркуша

Проаналізовано існуючі підходи до вирішення задачі розподілу частотного ресурсу в безпроводових mesh-мережах технології WiMAX, на основі недоліків яких сформульовані вимоги системного характеру до структури та змісту математичної моделі розподілу частотного ресурсу. Запропоновано математичну модель розподілу частотного ресурсу як задачі балансування числа підканалів між радіоканалами, що формуються mesh-станціями безпроводової мережі. Використання запропонованої моделі дозволило підвищити продуктивність безпроводової mesh-мережі в цілому, а також гарантувати відсутність «вузьких місць». Зростання продуктивності mesh-мережі також обумовлювалося гарантією відсутності первинної та вторинної інтерференції.

Ключові слова: математична модель, mesh-мережа, WiMAX, балансування, розподіл частотного ресурсу, продуктивність.

MODEL OF A BALANCED DISTRIBUTION SUBCHANNEL IN WIMAX MESH-NETWORK

S.V. Garkusha, Ahmed Hassan Abed, O.V. Garkusha

Were analyzed existing approaches to the problem of the frequency resource allocation in wireless mesh-networking technology WiMAX, based on deficiencies which set forth the requirements of a systemic nature to the structure and content of a mathematical model of the distribution of the frequency resource. Proposed a mathematical model of the distribution of the frequency resource as the task of balancing the number of subchannels between the radio channels formed by the mesh-stations of a wireless network. Using the proposed model allows us to improve the performance of wireless mesh-network as a whole, as well as to guarantee the absence of "bottlenecks". Productivity growth is the mesh-network also stemmed from the lack of guarantee of the primary and secondary interference.

Keywords: mathematical model, mesh-network, WiMAX, balancing, frequency resource allocation, performance.