УДК 621.391

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ СОГЛАСОВАННОГО РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НЕПЕРЕКРЫВАЮЩИХСЯ ЧАСТОТНЫХ КАНАЛОВ И ПОТОКОВОЙ МАРШРУТИЗАЦИИ В МНОГОКАНАЛЬНЫХ МНОГОИНТЕРФЕЙСНЫХ MESH-СЕТЯХ СТАНДАРТА IEEE 802.11

С.В. ГАРКУША

Полтавский университет экономики и торговли

Abstract *– An approach to the use of hypergraphs and graphs Koenig for modeling multilchannel multiradio mesh-networking standard IEEE 802.11. This, in turn, allowed for a fuller and describe in detail all the possible configurations of mesh-network as a whole and its individual elements in solving the problem of distribution of non-overlapping frequency channels in the form of a hypergraph as well as dissimilar vertices of Koenig in solving the problem of routing. Based on hypergraph and flat koenigs representation of multi- multilchannel multiradio mesh-network in the work performed consistent solution of problems of distribution of non-overlapping frequency channels and stream routing. The solution of the problem of distribution of non-overlapping frequency channels is to break mesh- network connected collision domains and routing problem in the identification of collision domains through which traffic is to be transmitted from the sender to the recipient, and so that end-to-end performance requirements have been satisfied. Also in the paper analyzed the proposed coherent and coordinated problem solving distribution of non-overlapping frequency channels and stream routing. The analysis determined that an agreed solution of these problems using the proposed model allows more than 75% increase in the intensity of the flow entering service in multil-channel multiradio mesh- network.*

Анотація *– Запропоновано підхід до використання гіперграфів і графів Кьоніга при моделюванні багатоканальних багатоінтерфейсних mesh-мереж стандарту IEEE 802.11. Це, в свою чергу, дозволило більш повно і детально описати можливі конфігурації як всієї mesh-мережі в цілому, так і окремих її елементів при вирішенні задачі розподілу частотних каналів, що не перекриваються, у вигляді гіперграфа, а також у вигляді різнорідних вершин графа Кьоніга при вирішенні задачі маршрутизації. Ґрунтуючись на гіперграфовому, а також плоскому кьоніговому поданні багатоканальної багатоінтерфейсної mesh-мережі, в роботі виконується узгоджене вирішення задач розподілу частотних каналів і потокової маршрутизації.*

Аннотация *– Предложен подход к использованию гиперграфов и графов Кенига при моделировании многоканальных многоинтерфейсных mesh-сетей стандарта IEEE 802.11. Это, в свою очередь, позволило более полно и детально описать возможные конфигурации как всей mesh-сети в целом, так и отдельных ее элементов при решении задачи распределения неперекрывающихся частотных каналов в виде гиперграфа, а также в виде разнородных вершин графа Кенига при решении задачи маршрутизации. Основываясь на гиперграфовом, а также плоском кениговом представлении mesh-сети, в работе выполняется согласованное решение задач распределения неперекрывающихся частотных каналов и потоковой маршрутизации.*

Введение

На сегодняшний день постоянная модернизация протоколов, проводимая в семействе стандартов IEEE 802.11, направлена на повышение производительности беспроводных локальных сетей доступа (Wireless Local Access Networks, WLAN). При этом ведутся активные действия по разработке и внедрению нового стандарта

IEEE 802.11ac для построения WLAN. Существенный прирост производительности сетей IEEE 802.11ac достигается за счет использования более широких каналов, повышения эффективности модуляции (способа передачи битов данных с помощью радиочастотных волн) и многопользовательских соединений (Multi-User MIMO).

Наряду с внедрением новых стандартов в технологию WLAN повышения производительности можно добиться использованием многошаговых (multi-hop) беспроводных mesh-сетей (Wireless Mesh Networks, WMN) стандарта IEEE 802.11 [1]. Наиболее высокого результата при повышении производительности беспроводной сети (до 2-3-х раз) можно достичь при использовании многоинтерфейсных многоканальных беспроводных mesh-сетей (Multi-Radio Multi-Channel Wireless Mesh Networks, MR MC WMN) [2, 3], предполагающих использование как одного, так и нескольких радиоинтерфейсов на каждой mesh-станции, настроенных на различные неперекрывающиеся частотные каналы (ЧК). Высокие заявленные потенциальные возможности MR MC WMN стандарта IEEE 802.11 обеспечиваются, с одной стороны, результативными решениями задачи распределения неперекрывающихся ЧК, а с другой стороны, выдвигают жесткие требования к эффективности средств управления ресурсами сети и, в частности, к протоколам управления трафиком и маршрутизации.

В результате анализа известных решений по распределению неперекрывающихся ЧК [4-23] и маршрутизации [24-26] установлено, что все они базируются на использовании графового представления WMN, не обеспечивая при этом адекватного учета их особенностей из-за формирования доменной структуры mesh-сети. Таким образом, при моделировании MR MC WMN необходимо использовать более эффективные, хотя, возможно, и более сложные, способы представления mesh-сети с использованием топологических идей [27, 28]. Для решения задач распределения неперекрывающихся ЧК и маршрутизации в MR MC WMN хорошо себя зарекомендовал подход, основанный на гиперграфовом представлении mesh-сети [29-31].

В рамках гиперграфового представления существует возможность математического описания MR MC WMN с точки зрения решения задачи распределения неперекрывающихся частотных каналов [32, 33] (структурной самоорганизации) и задачи маршрутизации [34] (функциональной самоорганизации) с использованием гиперграфового представления mesh-сети. Необходимо заметить, что указанные задачи структурной и функциональной самоорганизации MR MC WMN с использованием моделей [32-34] решаются отдельно на канальном и сетевом уровнях эталонной модели взаимодействия открытых систем, не обеспечивая при этом их согласованность. Однако достаточно большой источник производительности WMN заключается в повышении уровня согласованности решения задач распределения неперекрывающихся ЧК и маршрутизации, что может быть обеспечено лишь при использовании единого математического описания. Поэтому актуальной задачей является разработка модели структурно-функциональной самоорганизации многоканальных многоинтерфейсных mesh-сетей с использованием гиперграфов, обеспечивающих согласованные решения задач распределения неперекрывающихся частотных каналов и маршрутизации.

I. Гиперграфовое представление MR MC WMN

В рамках гиперграфового представления, как было показано в работах [32, 33], MR MC WMN ставится в соответствие гиперграф $H(I, J; R)$, где I – множество вершин, J – множество ребер, R – предикат, определяющий смежность станций с зонами устойчивого приема (Transmission Range, TR). $I = \{n_i, i = \overline{1, N}\}$, где n_i – элемент множества I, моделирующий mesh-станции MR MC WMN, N – их общее количество в mesh-сети. $J = \{z_j, j = \overline{1, Z}\}$, где z_j – элемент множества J, моделирующий зону устойчивого приема, Z – их общее количество в MR MC WMN. Предикат R, являясь инцидентором гиперграфа H, определяет принадлежность i-й станции j-й зоне устойчивого приема. Так, в случае, если i-я mesh-станция участвует в формировании j-й зоны устойчивого приема, то предикат $R(n_i, z_j)$ – истинный, т.е. равный единице, в противном случае $R(n_i, z_j)$ – ложный, т.е. равный нулю. В результате этого описание MR MC WMN может быть произведено с использованием конечного гиперграфа $H(I, J; R)$, состоящего из пары множеств вершин $I = \{n_i, i = \overline{1, N}\}$ и ребер $J = \{z_j, j = \overline{1, Z}\}$ вместе с двуместным предикатом $R \Leftrightarrow R(n_i, z_j)$, определенным для всех $n_i \in I$ и $z_j \in J$ [29-31].

В качестве примера рассмотрим конфигурацию MR MC WMN (рис. 1), представленную в работе [34], для дальнейшей оценки получаемого эффекта с точки зрения производительности при обеспечении согласованного решения задач распределения неперекрывающихся ЧК и маршрутизации. Конфигурация MR MC WMN (рис. 1) состоит из пяти зон устойчивого приема (Z=5), формируемых двадцатью пятью mesh-станциями (N=25). Указанной конфигурации mesh-сети соответствует гиперграф $H(I, J; R)$, изображенный на рис. 2, с множеством вершин $I = \{n_1, n_2, \ldots, n_{25}\}$, множеством зон устойчивого приема $J = \{z_1, z_2, \ldots, z_5\}$ и предикатом $R(n_i, z_j)$, определяющим принадлежность той или иной станции к одной из зон устойчивого приема.

II. Модель распределения неперекрывающихся ЧК в MR MC WMN

Основываясь на гиперграфовом представлении MR MC WMN (рис. 2), исходные данные задачи распределения неперекрывающихся ЧК, решаемой с использованием математической модели [12, 22, 23, 35, 36], будут представлены в виде:

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

2) $T = \{k_t, t = \overline{1, K}\}$ – множество неперекрывающихся ЧК, где k_t – элемент множества T, моделирующий t-й неперекрывающиеся ЧК, K – их общее количество, в зависимости от используемого стандарта беспроводной связи (в технологии IEEE 802.11b/g доступно $3 \div 4$, в технологии IEEE 802.11a – 12, а в технологии IEEE 802.11ac – до 19-и неперекрывающихся ЧК);

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

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

5) $m^*_{n_i}$ – целочисленный параметр, характеризующий минимально необходимое число включенных РИ на i-й mesh-станции. Как правило, данный параметр равен единице;

6) m_{n_i} – число поддерживаемых РИ на i-й mesh-станции, которое, как правило, равно $1 \div 3$.

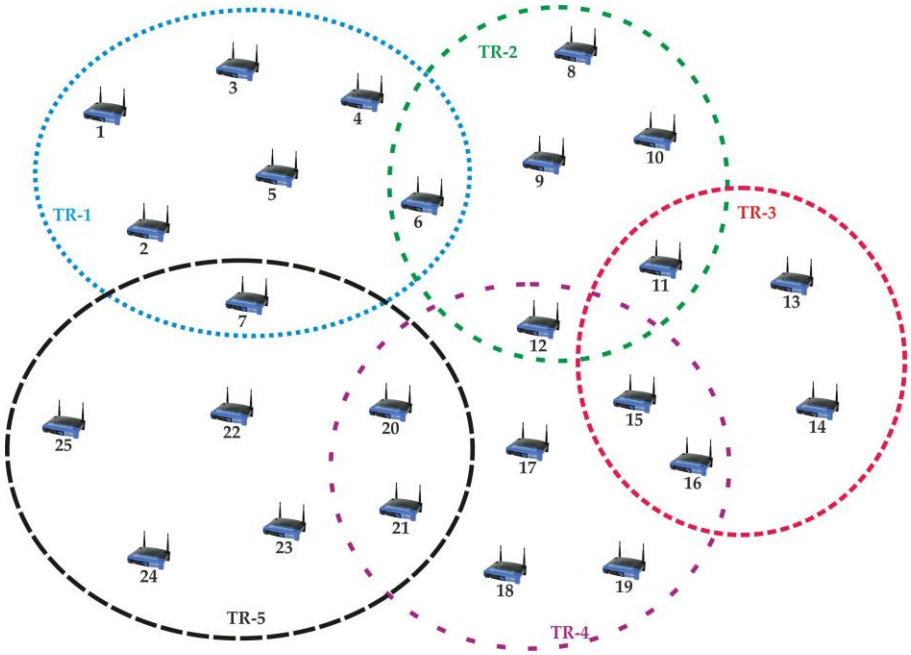

Рис. 1. Пример возможной конфигурации mesh-сети

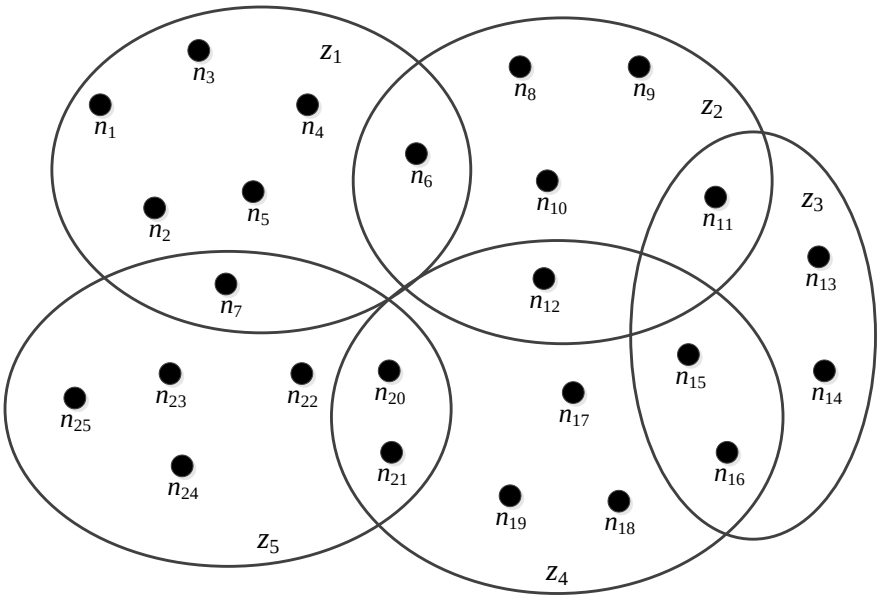

Рис. 2. Гиперграфовое представление MR MC WMN, приведенной на рис. 1

В рамках гиперграфового описания удается однозначно формализовать правила формирования матрицы зон устойчивого приема (TR-матрицы), введенной в работах [12, 22, 23, 35, 36], с помощью матрицы инциденций гиперграфа H

$$A(H) \doteq \left\| a_{z_j, n_i} \right\|, \tag{1}$$

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

Исходя из выражения (1), TR-матрица является прямоугольной, количество строк которой соответствует числу зон устойчивого приема J, а число столбцов соответствует общему числу mesh-станций I в сети.

В рамках модели [12, 22, 23, 35, 36] в ходе решения задачи распределения ЧК между mesh-станциями сети необходимо обеспечить расчет булевой управляющей переменной

$$x_{n_i,k_t} \in \{0,1\} \ (i = \overline{1,N};\ t = \overline{1,K}), \tag{2}$$

где $x_{n_i,k_t} = \begin{cases} 1, \text{ если } t\text{-й ЧК на } i\text{-й mesh-станции закреплен только} \\ \quad \text{за одним из РИ;} \\ 0, \text{ в противном случае.} \end{cases}$

Результатом решения задачи распределения неперекрывающихся ЧК должно быть разбиение mesh-сети в целом и каждой зоны устойчивого приема в отдельности на связные между собой домены коллизий, в рамках которых станции работают на одном и том же ЧК. В связи с этим при расчете искомых переменных x_{n_i,k_t} в каждой отдельно взятой j-й зоне устойчивого приема необходимо выполнить ряд важных условий ограничений:

1. Условие включения i-й mesh-станции в сеть:

$$\sum_{t=1}^{K} x_{n_i,k_t} \geq m^*_{n_i} \ (i = \overline{1,N}), \tag{3}$$

где $1 \leq m^*_{n_i} \leq m_{n_i}$, $\sum_{t=1}^{K} x_{n_i,k_t}$ – количество ЧК, закрепленных за радиоинтерфейсами одной mesh-станции.

2. Условие выделения i-й mesh-станции количества ЧК, не превышающего количества ее РИ:

$$\sum_{t=1}^{K} x_{n_i,k_t} \leq m_{n_i} \ (i = \overline{1,N}). \tag{4}$$

3. Условие работы двух mesh-станций друг с другом (в рамках одной зоны устойчивого приема) не более чем на одном ЧК:

$$\sum_{t=1}^{K} \left(x_{n_i,k_t} x_{n_s,k_t} \right) \leq 1 \ (i,s = \overline{1,N};\ R(n_i, z_j) = R(n_s, z_j) = 1;\ z = \overline{1,Z}), \tag{5}$$

которое вводится для устранения нежелательной структурной избыточности.

4. Условие того, что произвольная mesh-станция на используемом ею ЧК работает хотя бы с одной mesh-станцией своей TR:

$$x_{n_i,k_t} \le \sum_{\substack{s=1 \\ s\neq i}}^{N} x_{n_s,k_t} \ \ (R(n_i,z_j)=R(n_s,z_j)=1;\ j=\overline{1,Z};\ t=\overline{1,K}), \tag{6}$$

где $\sum_{\substack{s=1 \\ s\neq i}}^{N} x_{n_s,k_t}$ – число mesh-станций в j-й зоне устойчивого приема (без учета анализируемой mesh-станции), которые работают на t-м ЧК.

5. Условие связности mesh-сети (доменов коллизий) в каждой зоне устойчивого приема:

$$\sum_{t=1}^{K}\sum_{i=1}^{N} x_{n_i,k_t} \ge N_H(z_j)+K-1-b \ \ (j=\overline{1,Z};\ R(n_i,z_j)=1), \tag{7}$$

при условии, что $b=\begin{cases} K-N, \text{если } K>INT\left(\left[\sum_{n_i=1}^{N} m_{n_i}\right]/2\right); \\ 0, \text{в противном случае.} \end{cases}$

Выражение $INT\left(\left[\sum_{i=1}^{N} m_{n_i}\right]/2\right)$ в условии-ограничении (7) определяет максимальное число неперекрывающихся ЧК, которые могут быть включены на РИ mesh-станций.

Выполнение условия (7) гарантирует, что количество используемых ЧК в j-й зоне устойчивого приема может быть распределено между РИ mesh-станций, входящих в ее состав.

6. Условие отсутствия эффекта «скрытой станции», т.е. mesh-станция, которая принадлежит одновременно нескольким зонам устойчивого приема, не должна работать на одном и том же ЧК с mesh-станциями различных зон устойчивого приема:

$$a_{z_j,n_i}a_{z_q,n_i}x_{n_i,k_t}\sum_{\substack{R(n_s,z_q)=1 \\ R(n_s,z_j)=0}} x_{n_s,k_t}\sum_{\substack{R(n_r,z_q)=1 \\ R(n_r,z_j)=0}} x_{n_r,k_t}=0, \tag{8}$$

при условии, что $i=\overline{1,N}$; $t=\overline{1,K}$; $j,q=\overline{1,Z}$; $j\neq q$; $i\neq s\neq r$.

7. Условие работы одной из множества mesh-станций, находящихся на пересечении нескольких зон устойчивого приема и использующих не менее двух ЧК, с mesh-станциями разных зон устойчивого приема:

$$\begin{cases} a_{z_j,n_i}a_{z_q,n_i}x_{n_i,k_t}x_{n_i,k_h}\left(\sum_{s=1}^{N}\left(a_{z_j,n_s}x_{n_s,k_t}\right)+\sum_{s=1}^{N}\left(a_{z_j,n_s}x_{n_s,k_h}\right)\right)\left(\sum_{r=1}^{N}\left(a_{z_q,n_r}x_{n_r,k_t}\right)+\sum_{r=1}^{N}\left(z_q,n_r\,x_{n_r,k_h}\right)\right)>0; \\ a_{z_j,n_s}a_{z_q,n_s}=0; \\ a_{z_j,n_r}a_{z_q,n_r}=0; \end{cases} \tag{9}$$

при условии, что $t,h=\overline{1,K}$; $t\neq h$; $j\neq q$; $i\neq s\neq r$. Например, выполнение условия $a_{z_j,n_s}a_{z_q,n_s}=0$ означает то, что s-я станция не находится на пересечении j-й и q-й зон устойчивого приема.

8. Условие работы хотя бы одной из множества mesh-станций, находящихся на пересечении нескольких зон устойчивого приема, более чем на одном ЧК:

$$\sum_{t=1}^{K}\sum_{i=1}^{N}\left(a_{z_j,n_i}a_{z_q,n_i}x_{n_i,k_t}\right)\geq\sum_{i=1}^{N}\left(a_{z_j,n_i}a_{z_q,n_i}\right)+1\quad(j,q=\overline{1,Z};\ j\neq q),\tag{10}$$

где $\sum_{t=1}^{K}\sum_{i=1}^{N}\left(a_{z_j,n_i}a_{z_q,n_i}x_{n_i,k_t}\right)$ – число включенных РИ на mesh-станциях, которые находятся на пересечении j-й и q-й зон устойчивого приема; $\sum_{i=1}^{N}\left(a_{z_j,n_i}a_{z_q,n_i}\right)$ – число mesh-станций, находящихся на пересечении j-й и q-й зон устойчивого приема.

Выполнение условия (10) совместно с (7)-(9) гарантирует, что число включенных РИ с учетом числа mesh-станций и поддерживаемых в технологии беспроводной связи неперекрывающихся ЧК обеспечит связность многоканальной mesh-сети.

При выборе критерия оптимальности для решения задачи распределения неперекрывающихся ЧК необходимо, например, обеспечить минимизацию уровня интерференции, повышение уровня связности mesh-сети и устранение эффекта «скрытой» станции [13]. В работе [36] предложен подход по повышению общей производительности беспроводной mesh-сети, основанный на минимизации суммы квадратичных форм от числа станций, формирующих домены коллизий в рамках той или иной TR,

$$\mathbf{min}\sum_{j=1}^{Z}\sum_{t=1}^{K}\left[\sum_{i=1}^{N}x_{n_i,k_t}a_{n_i,z_j}\right]^2\tag{11}$$

при учете условий-ограничений (2)-(10). Использование данного критерия позволит избавиться от избыточности при решении задачи распределения ЧК в многоканальной многоинтерфейсной mesh-сети. Указанная избыточность выражается в закреплении ЧК за РИ mesh-станций сети, которые могли бы и не использоваться. Использование данного критерия оптимизации позволяет минимизировать число станций в доменах коллизий, тем самым снизив уровень интерференции и вероятность возникновения самих коллизий [36].

Результатом решения задачи распределения ЧК с использованием модели (2)-(11) является расчет управляющих переменных x_{n_i,k_t}, в результате чего предикат $P(n_i,k_t,z_j)$, определяющий закрепление t-го частотного канала за i-й станцией, принадлежащей j-й зоне устойчивого приема, может быть рассчитан из выражения:

$$P(n_i,k_t,z_j)=x_{n_i,k_t}R(n_i,z_j).\tag{12}$$

Закрепление частотных каналов за радиоинтерфейсами mesh-станций одной зоны устойчивого приема приводит к формированию в ней нескольких доменов

коллизий. При этом домен коллизий формируется mesh-станциями, использующими один и тот же ЧК. Таким образом, в результате решения задачи распределения неперекрывающихся ЧК происходит формирование MR MC WMN, которая может быть представлена в виде гиперграфа $G(I,U;Q)$, где $U=\{d_u, u=\overline{1,D}\}$ – множество формируемых доменов коллизий, d_u – элемент множества U, моделирующий домены коллизий, D – общее количество доменов коллизий в MR MC WMN. Предикат $Q(n_i,d_u)$ в свою очередь однозначно определяется соответствием

$$Q(n_i,d_u) \Leftrightarrow P(n_i,k_t,z_j). \quad (13)$$

Так, если i-й mesh-станции, входящей в состав j-й зоны устойчивого приема, выделен t-й неперекрывающийся частотный канал ($P(n_i,k_t,z_j)$=1), то станция участвует в формировании u-го домена коллизий и предикат $Q(n_i,d_u)$=1. В противном случае $Q(n_i,d_u)$=0.

Пример mesh-сети, получаемой в результате решения задачи распределения неперекрывающихся ЧК с использованием модели (2)-(11), приведен на рис. 3, а ее гиперграфовое представление показано на рис. 4.

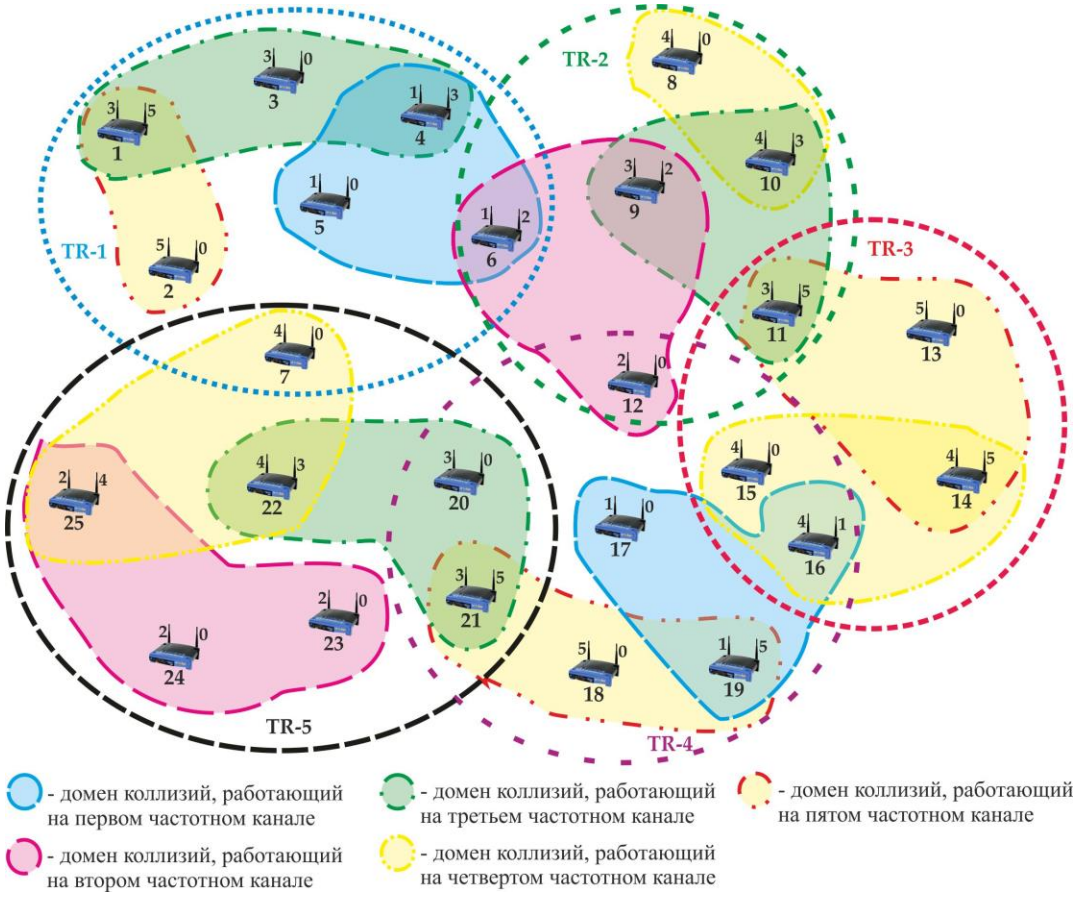

Рис. 3. Пример MR MC WMN, основанной на использовании пяти неперекрывающихся ЧК

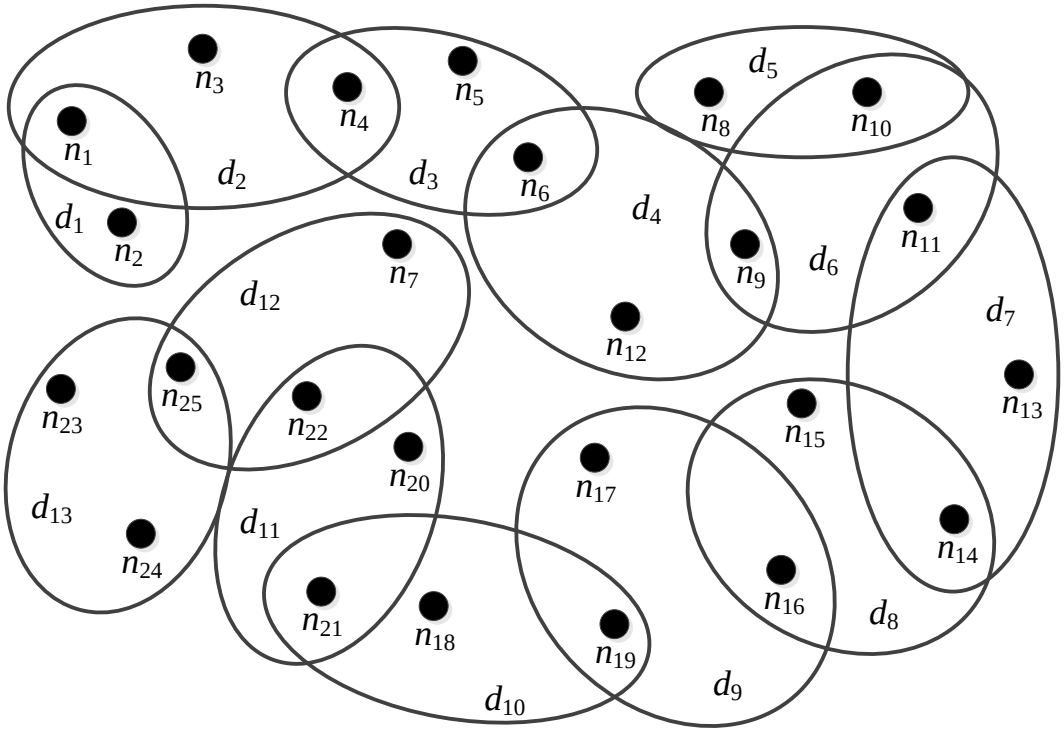

Рис. 4. Гиперграфовое представление MR MC WMN, приведенной на рис. 3

Таким образом, гиперграфовое представление MR MC WMN, получаемое в результате решения задачи распределения неперекрывающихся ЧК, 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. Кроме того, разбиение mesh-сети по доменам коллизий, получаемое в результате решения задачи распределения неперекрывающихся ЧК, может быть использовано в качестве основы для решения задачи маршрутизации. Однако при решения задачи маршрутизации возникает необходимость учета не только структурных, но и функциональных характеристик многоинтерфейсной многоканальной mesh-сети. В результате этого возникает необходимость в формализации задачи маршрутизации в MR MC WMN, представленной в виде гиперграфа. Так, в работе [34] приведены результаты преобразования гиперграфового представления MR MC WMN к виду графа Кенига.

III. Представление MR MC WMN в виде графа Кенига

С целью решения задачи маршрутизации в MR MC WMN в работе [34] предложено отнести гиперграфу $G(I,U;Q)$, моделирующему mesh-сеть в виде доменов коллизий, граф Кенига $K(G)=(I,U;Q)$ с множеством вершин $I \cup U$ [29-31]. При этом граф $K(G)$ называется кениговым представлением гиперграфа G. Смежность вершин двух типов определяется предикатом $Q(n_i,d_u)$ таким образом, что вершины $n_i \in I$ и $d_u \in U$ в $K(G)$ смежные тогда и только тогда, когда в G i-я вершина инцидентна u-му ребру, т.е. i-я станция участвует в формировании u-го домена коллизий. Таким образом, конфигурации MR MC WMN (рис. 3) и ее гиперграфовому

представлению (рис. 4) будет соответствовать плоское кенигово представление MR MC WMN, представленное на рис. 5.

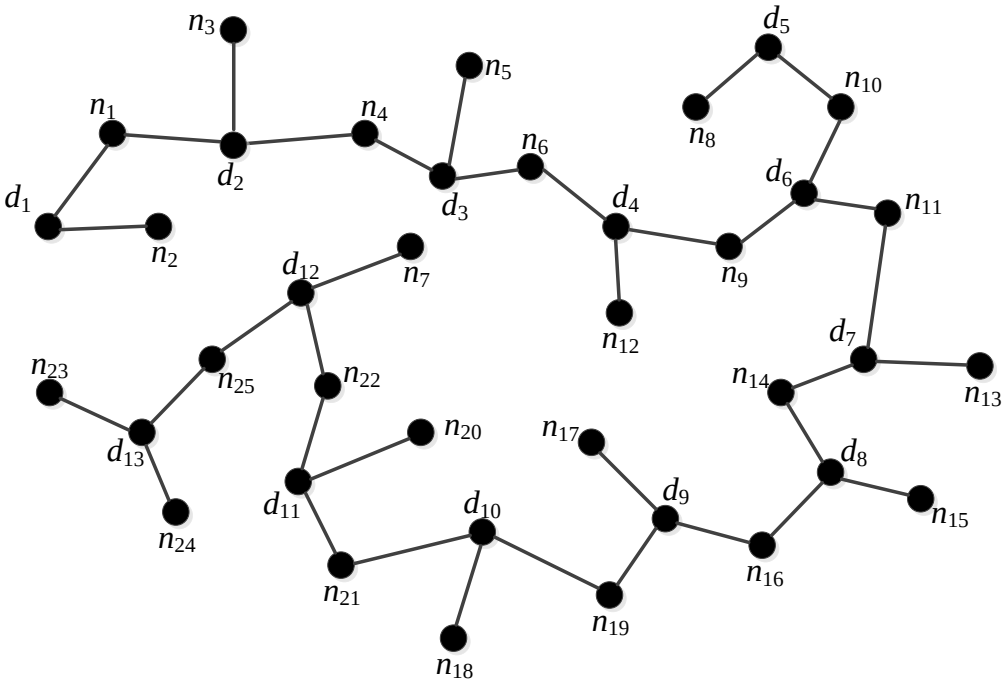

Рис. 5. Плоское кенигово представление возможной конфигурации WMN

Плоское кенигово представление MR MC WMN (рис. 5) состоит из множества вершин $N = \{n_1, n_2, \ldots, n_{25}\}$, моделирующих mesh-станции, а также множества вершин $D = \{d_1, d_2, \ldots, d_{13}\}$, моделирующих формируемые домены коллизий. В свою очередь предикат $Q(n_i, d_u)$ определяет принадлежность той или иной mesh-станции к одному из доменов коллизий.

IV. Потоковая модель маршрутизации в MR MC WMN

Основываясь на плоском кениговом представлении (рис. 5), решение задачи маршрутизации с использованием потоковой модели заключается в определении тех доменов коллизий, через которые должны быть переданы пакеты от отправителя к получателю, причем таким образом, чтобы межконцевые требования по производительности были удовлетворены. В качестве математической модели маршрутизации в [34] предложена потоковая модель, производящая учет особенностей структурно-функционального построения MR MC WMN – порядка распределения частотных каналов, пропускных способностей доменов коллизий, характеристик трафика, порядка обслуживания пакетов на mesh-станциях (беспроводных маршрутизаторах) сети и др.

В рамках потоковой модели маршрутизации, предложенной в [34], производится расчет множества маршрутных переменных

$$\vec{X} = \begin{bmatrix} x^{v}_{n_i,d_u} \\ --- \\ x^{v}_{d_u,n_i} \end{bmatrix}, \tag{14}$$

где $x^{v}_{n_i,d_u}$ – доля интенсивности v-го потока, передаваемого от i-й mesh-станции к станциям u-го домена коллизий, $x^{v}_{d_u,n_i}$ – доля интенсивности v-го потока, передаваемого станциями u-го домена коллизий к i-й mesh-станции, каждая из которых характеризует долю интенсивности v-го потока, направленного через i-ю mesh-станцию в u-м домене коллизий.

Использование кенигового представления MR MC WMN позволило более адекватно сформулировать условия сохранения потока [34] как в mesh-станциях и доменах коллизий, так и в mesh-сети в целом:

$$\begin{cases} \sum\limits_{u:Q(n_i,d_u)=1} x^{v}_{n_i,d_u} = 1, \;\; v \in V, \; n_i = s_v; \\ \sum\limits_{u:Q(n_i,d_u)=1} x^{v}_{n_i,d_u} - \sum\limits_{u:Q(n_i,d_u)=1} x^{v}_{d_u,n_i} = 0, \;\; v \in V, \; n_i \neq s_v, p_v; \\ \sum\limits_{i:Q(n_i,d_u)=1} x^{v}_{d_u,n_i} - \sum\limits_{i:Q(n_i,d_u)=1} x^{v}_{n_i,d_u} = 0, \; v \in V; \\ \sum\limits_{u:Q(n_i,d_u)=1} x^{v}_{d_u,n_i} = 1, \; v \in V, \; n_i = p_v, \end{cases} \tag{15}$$

где V – множество потоков в WMN; s_v – станция-отправитель и p_v – станция-получатель для пакетов v-го потока.

В [34] показано, что традиционно [37-39] в зависимости от вида дополнительно накладываемых ограничений на управляющие переменные задача маршрутизации может быть классифицирована двояко. В случае наличия ограничений

$$0 \le x^{v}_{n_i,d_u} \le 1; \tag{16}$$

$$0 \le x^{v}_{d_u,n_i} \le 1, \tag{17}$$

сформулированная задача классифицируется как задача многопутевой маршрутизации, а если имеют место ограничения

$$x^{v}_{n_i,d_u} \in \{0,1\}; \tag{18}$$

$$x^{v}_{d_u,n_i} \in \{0,1\}, \tag{19}$$

то реализуется однопутевой способ доставки пакетов обслуживаемых потоков.

Условия-ограничения, отвечающие за предотвращение превышения текущих значений доступной скорости передачи, в рамках модели [34] имеют вид

$$\sum_{v=1}^{V} r^{v} x^{v}_{n_i,d_u} \le c_{n_i,d_u}, \;\; (i = \overline{1,N}; \; u = \overline{1,D}), \tag{20}$$

$$\sum_{v=1}^{V} r^{v} x_{d_u,n_i}^{v} \le c_{d_u,n_i}, \quad (i=\overline{1,N};\ u=\overline{1,D}), \tag{21}$$

где r^{v} – средняя интенсивность v-го потока, поступающего в mesh-сеть на обслуживание, c_{n_i,d_u} – текущее значение доступной скорости передачи данных от i-й mesh-станции другим mesh-станциям u-го домена коллизий, а c_{d_u,n_i} – текущее значение доступной скорости передачи к i-й mesh-станции от других mesh-станций u-го домена коллизий.

В соответствии с протоколом множественного доступа с контролем несущей и избеганием коллизий (Carrier Sense Multiple Access With Collision Avoidance, CSMA/CA) [40] доступ к среде передачи одного домена коллизий WMN будет предоставляться в любой момент времени только одной mesh-станции. Тогда в случае высокой загруженности WMN, т.е. когда все станции пытаются производить передачу данных, скорости передачи c_{n_i,d_u} и c_{d_u,n_i} будут определяться из выражений

$$c_{n_i,d_u} = \frac{Y_{d_u}}{\sum_{i=1}^{N} Q(n_i,d_u)}, \quad (u=\overline{1,D}), \tag{22}$$

$$c_{d_u,n_i} = Y_{d_u}\left(\frac{\sum_{i=1}^{N} Q(n_i,d_u)-1}{\sum_{i=1}^{N} Q(n_i,d_u)}\right), \quad (u=\overline{1,D}), \tag{23}$$

где Y_{d_u} – максимальная производительность u-го домена коллизий WMN на сетевом уровне, поддерживаемая в используемой технологии беспроводной связи (Мбит/с) (табл. 1); $\sum_{i=1}^{N} Q(n_i,d_u)$ – количество mesh-станций, участвующих в формировании u-го домена коллизий.

Таблица 1. Производительности WMN семейства стандартов IEEE 802.11

Стандарт	Максимальная производительность u-го домена коллизий на физическом уровне, (Мбит/с)	Максимальная производительность u-го домена коллизий на сетевом уровне, Y_{d_u} (Мбит/с)
802.11a	54	24
802.11b	11	4,8
802.11g	54	24
802.11n	300	60

Значение производительности c_{n_i,d_u}, определяемое с использованием выражения (22), является достаточно грубым и должно выполняться только в условиях, когда все станции пытаются производить передачу данных. С целью учета наличия по-

токов, передаваемых через mesh-станцию в MR MC WMN, производительность c_{n_i,d_u} может быть определена из выражения

$$c_{n_i,d_u} = \frac{Y_{d_u}}{\sum\limits_{\substack{s=1 \\ i \neq s}}^{N-1} Q(n_s,d_u) \left\lceil x^v_{n_s,d_u} \right\rceil + 1}, \quad (i = \overline{1,N};\ u = \overline{1,D}), \tag{24}$$

где $\lceil\ \rceil$ – операция округления к большему целому.

Кроме того, с целью учета интенсивности v-го потока, передаваемого через i-ю mesh-станцию, в u-м домене коллизий значение c_{n_i,d_u} будет определяться из выражения

$$c_{n_i,d_u} = \left\lceil \frac{\sum\limits_{v=1}^{V} x^v_{n_i,d_u}}{\sum\limits_{s=1}^{N}\sum\limits_{v=1}^{V} \left(x^v_{n_s,d_u} Q(n_s,d_u) \right)} \right\rceil Y_{d_u}, \quad (i = \overline{1,N};\ u = \overline{1,D}). \tag{25}$$

В ходе решения задачи маршрутизации в качестве критерия оптимальности получаемых решений в [34] выбрано следующее условие:

$$\min_x \sum_{v=1}^{V} r^v \left(\sum_{u:Q(n_i,d_u)=1} x^v_{n_i,d_u} + \sum_{i:Q(n_i,d_u)=1} x^v_{d_u,n_i} \right). \tag{26}$$

Использование критерия (26) обеспечивает минимизацию загруженности MR MC WMN, т.е. суммарную интенсивность обслуженного сетью потока с учетом его приоритета. В приведенной постановке в работе [34] сформулированы несколько оптимизационных задач, где:

– задача (14)-(17), (20)-(23), (26) относится к классу задач линейного программирования (Linear Programming, LP);

– задача (14), (15), (18), (19), (20)-(23), (26) – задача целочисленного линейного программирования (Integer Linear Programming, ILP);

– задача (14)-(17), (20), (21), (23), (24), (26) – задача нелинейного программирования (Nonlinear Programming, NLP);

– задача (14)-(17), (20), (21), (23), (25), (26) – задача NLP;

– задача (14), (15), (18)-(21), (23), (24), (26) – задача смешанного целочисленного нелинейного программирования (Mixed Integer Nonlinear Programming, MINLP);

–(14), (15), (18)-(21), (23), (25), (26) – MINLP.

В результате анализа модели (2)-(11), используемой при решении задачи распределения неперекрывающихся ЧК, и потоковой модели маршрутизации (14)-(26) установлено, что данные задачи решаются последовательно. Другими словами, результаты решения задачи распределения неперекрывающихся частотных каналов используются в качестве исходных данных при решении задачи маршрутизации и не учитывают при этом характеристики v-го потока, поступающего в MR MC WMN на обслуживание. Поэтому актуальной является задача усовершенствования пред-

ложенных ранее моделей (2)-(11) и (14)-(26) с целью увеличения производительности mesh-сети. Усовершенствование будет заключаться в возможности одновременного решения задачи распределения неперекрывающихся ЧК и задачи маршрутизации при учете характеристик v-го потока.

V. Разработка модели согласованного решения задач распределения неперекрывающихся ЧК и потоковой маршрутизации

Пусть в рамках предлагаемой модели MR MC WMN описывается с использованием гиперграфа $H(I, J; R)$. Для обеспечения согласованного решения задач распределения неперекрывающихся ЧК и потоковой маршрутизации в качестве искомого вектора управляющих переменных может выступать форма

$$\vec{X} = \begin{bmatrix} x_{n_i,k_t} \\ --- \\ x^v_{n_i,d_u} \\ --- \\ x^v_{d_u,n_i} \end{bmatrix}. \qquad (27)$$

Для расчета искомых переменных x_{n_i,k_t} необходимо обеспечить выполнение условий ограничений (3)-(10), отвечающих за распределение неперекрывающихся частотных каналов. Ввиду того, что при совместном решении задач распределения ЧК и потоковой маршрутизации в качестве исходных данных выступает mesh-сеть, состоящая из множества станций и формируемых ними зон устойчивого приема, в качестве маршрутных переменных выступают следующие: $x^v_{n_i,k_t}$ – переменная, характеризующая долю интенсивности v-го потока пакетов, передаваемого i-й mesh-станцией станциям, работающим на t-м частотном канале в рамках одной TR; $x^v_{k_t,n_i}$ – переменная, характеризующая долю интенсивности v-го потока пакетов, передаваемого к i-й mesh-станции от других станций, работающих на t-м частотном канале в рамках одной TR.

Скорость передачи данных в случае высокой загруженности WMN, т.е. когда все станции пытаются производить передачу данных, рассчитываемая с использованием выражений (22) и (23) при использовании искомых переменных $x^v_{n_i,k_t}$ и $x^v_{k_t,n_i}$, определяется из выражений

$$c_{n_i,k_t} = \frac{Y_{k_t}}{a_{z_j,n_i} \sum_{s=1}^{N} x_{n_s,k_t} a_{z_j,n_s}}, \quad (i = \overline{1,N},\ t = \overline{1,K}), \qquad (28)$$

$$c_{k_t,n_i} = Y_{k_t} \left(1 - \frac{1}{a_{z_j,n_i} \sum_{s=1}^{N} x_{n_s,k_t} a_{z_j,n_s}} \right), \quad (i = \overline{1,N},\ t = \overline{1,K}), \qquad (29)$$

где c_{n_i,k_t} – текущее значение доступной скорости передачи данных от i-й mesh-станции другим mesh-станциям, работающим на t-м ЧК в рамках одной TR; c_{k_t,n_i} – текущее значение доступной скорости передачи к i-й mesh-станции от других mesh-станций, работающих на t-м ЧК в рамках одной TR; Y_{k_t} – скорость передачи данных на сетевом уровне, поддерживаемая t-м частотным каналом в используемой технологии беспроводной связи (Мбит/с). В табл. 1 данный параметр соответствует Y_{d_u}.

Кроме того, переменная c_{n_i,k_t} в соответствии с выражениями (24) и (25) может быть рассчитана как:

- при учете наличия потоков, передаваемых через mesh-станцию в MR MC WMN

$$c_{n_i,k_t} = \frac{Y_{k_t}}{a_{z_j,n_i} \sum\limits_{\substack{s=1 \\ i \neq s}}^{N-1} \left\lceil x^v_{n_s,k_t} \right\rceil a_{z_j,n_s} + 1}, \quad (i = \overline{1,N};\ t = \overline{1,K}), \tag{30}$$

- при учете интенсивности v-го потока, передаваемого через i-ю mesh-станцию на t-м частотном канале

$$c_{n_i,k_t} = \left\lceil \frac{\sum\limits_{v=1}^{V} x^v_{n_i,k_t} a_{z_j,n_i}}{\sum\limits_{s=1}^{N} \sum\limits_{v=1}^{V} \left(x^v_{n_s,k_t} a_{z_j,n_i} \right)} \right\rceil Y_{k_t}, \quad (i = \overline{1,N};\ t = \overline{1,K}). \tag{31}$$

В соответствии с искомыми переменными (27) условие сохранения потока (15) принимает обновленный вид:

$$\begin{cases} \sum\limits_{t=1}^{K} \sum\limits_{j=1}^{Z} x^v_{n_i,k_t} a_{z_j,n_i} = 1, \ \ v \in V,\ n_i = s_v; \\ \sum\limits_{t=1}^{K} \sum\limits_{j=1}^{Z} x^v_{n_i,k_t} a_{z_j,n_i} - \sum\limits_{t=1}^{K} \sum\limits_{j=1}^{Z} x^v_{k_t,n_i} a_{z_j,n_i} = 0, \ \ v \in V,\ n_i \neq s_v, p_v; \\ \sum\limits_{i=1}^{N} \sum\limits_{j=1}^{Z} x^v_{k_t,n_i} a_{z_j,n_i} - \sum\limits_{i=1}^{N} \sum\limits_{j=1}^{Z} x^v_{n_i,k_t} a_{z_j,n_i} = 0, \ v \in V; \\ \sum\limits_{t=1}^{K} \sum\limits_{j=1}^{Z} x^v_{k_t,n_i} a_{z_j,n_i} = 1, \ v \in V,\ n_i = p_v. \end{cases} \tag{32}$$

Также, по аналогии с выражениями (16)-(19) на управляющие переменные могут быть наложены дополнительные ограничения, определяющие как задачу многопутевой маршрутизации

$$0 \le x^v_{n_i,k_t} \le 1; \tag{33}$$

$$0 \le x^v_{k_t,n_i} \le 1, \tag{34}$$

так и задачу однопутевой маршрутизации

$$x^{v}_{n_i,k_t} \in \{0,1\}; \quad (35)$$

$$x^{v}_{k_t,n_i} \in \{0,1\}. \quad (36)$$

Условия-ограничения (20) и (21), отвечающие за предотвращение превышения текущих значений доступной скорости передачи, имеют вид

$$\sum_{v=1}^{V} r^{v} x^{v}_{n_i,k_t} \le c_{n_i,k_t}, \quad (i=\overline{1,N};\ t=\overline{1,K}); \quad (37)$$

$$\sum_{v=1}^{V} r^{v} x^{v}_{k_t,n_i} \le c_{k_t,n_i}, \quad (i=\overline{1,N};\ t=\overline{1,K}). \quad (38)$$

Модель согласованного решения задач распределения неперекрывающихся ЧК и потоковой маршрутизации целесообразно представить в виде оптимизационной, так как в рамках ее решения необходимо произвести минимизацию количества станций, входящих в состав каждого домена коллизий, а также минимизацию загруженности MR MC WMN при учете приоритета потока:

$$\min_{X}\left(\sum_{j=1}^{Z}\sum_{t=1}^{K}\left[\sum_{i=1}^{N} g_{n_i,k_t} x_{n_i,k_t} a_{n_i,z_j}\right]^2 + \sum_{v=1}^{V} r^{v}\left[\sum_{t=1}^{K}\sum_{j=1}^{Z} g^{v}_{n_i,k_t} x^{v}_{n_i,k_t} a_{z_j,n_i} + \sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{Z} g^{v}_{k_t,n_i} x^{v}_{k_t,n_i} a_{z_j,n_i}\right]\right), \quad (39)$$

где g_{n_i,k_t} – величина удельного штрафа за формирование доменов коллизий больших размеров; $g^{v}_{n_i,k_t}$, $g^{v}_{k_t,n_i}$ – величина удельного штрафа за загруженность i-й mesh-станции на t-м частотном канале.

В выражении (39) первое слагаемое обеспечивает минимизацию количества станций, входящих в состав каждого из доменов коллизий, а второе слагаемое обеспечивает минимизацию использования (загруженности) станций и доменов коллизий mesh-сети. Таким образом, критерий оптимальности (39) характеризует относительные затраты на распределение частотных каналов и обслуживание потока на этапе доступа к сети и внутри MR MC WMN. Следовательно, в работе предложена модель согласованного решения задач распределения неперекрывающихся ЧК и потоковой маршрутизации, представленная вектором искомых переменных (27), условиями-ограничениями (3)-(10) и (28)-(38), а также критерием оптимальности (39). Согласованность решения указанных задач заключалась в учете особенностей обслуживаемого потока (интенсивности, станций адресатов и т.д.) при решении задачи распределения неперекрывающихся ЧК, что способствовало кроме повышения производительности mesh-сети и снижению ее загруженности.

VI. Сравнительный анализ последовательного и согласованного решений задач распределения неперекрывающихся ЧК и потоковой маршрутизации в MR MC WMN

В ходе исследования результатов последовательного и согласованного решений задач распределения неперекрывающихся ЧК и потоковой маршрутизации в MR

МС WMN рассмотрено множество вариантов mesh-сетей, для которых были получены результаты анализа. В качестве примера рассмотрим однопродуктовый случай, когда сеть обслуживает один поток, протекающий от одиннадцатой к двадцатой станции в mesh-сети, приведенной на рис. 1. Условимся, что в рамках рассматриваемой MR МС WMN все mesh-станции используют стандарт IEEE 802.11g с максимальной производительностью каждого домена коллизий на сетевом уровне 24 Мбит/с. На рис. 6 приведено плоское кенигово представление возможной конфигурации MR МС WMN (рис. 5) в виде двудольного ориентированного графа, получаемого в результате решения задачи распределения неперекрывающихся ЧК (2)-(11). В разрывах дуг двудольного ориентированного графа (рис. 6) указаны доступные пропускные способности между mesh-станциями (Мбит/с) доменов коллизий, получаемые в соответствии с выражением (22) и (23).

На рис. 7 и рис. 8 приведен результат решения задачи многопутевой потоковой маршрутизации с использованием модели (14)-(17), (20)-(23), (26) при интенсивности потока r =7,83 Мбит/с, поступающего в WMN. Результатом решения являются значения интенсивности потока (Мбит/с), протекающего между mesh-станциями различных доменов коллизий. Значения интенсивностей потоков и их направления указаны на рис. 7 вдоль ребер плоского кенигового представления MR МС WMN.

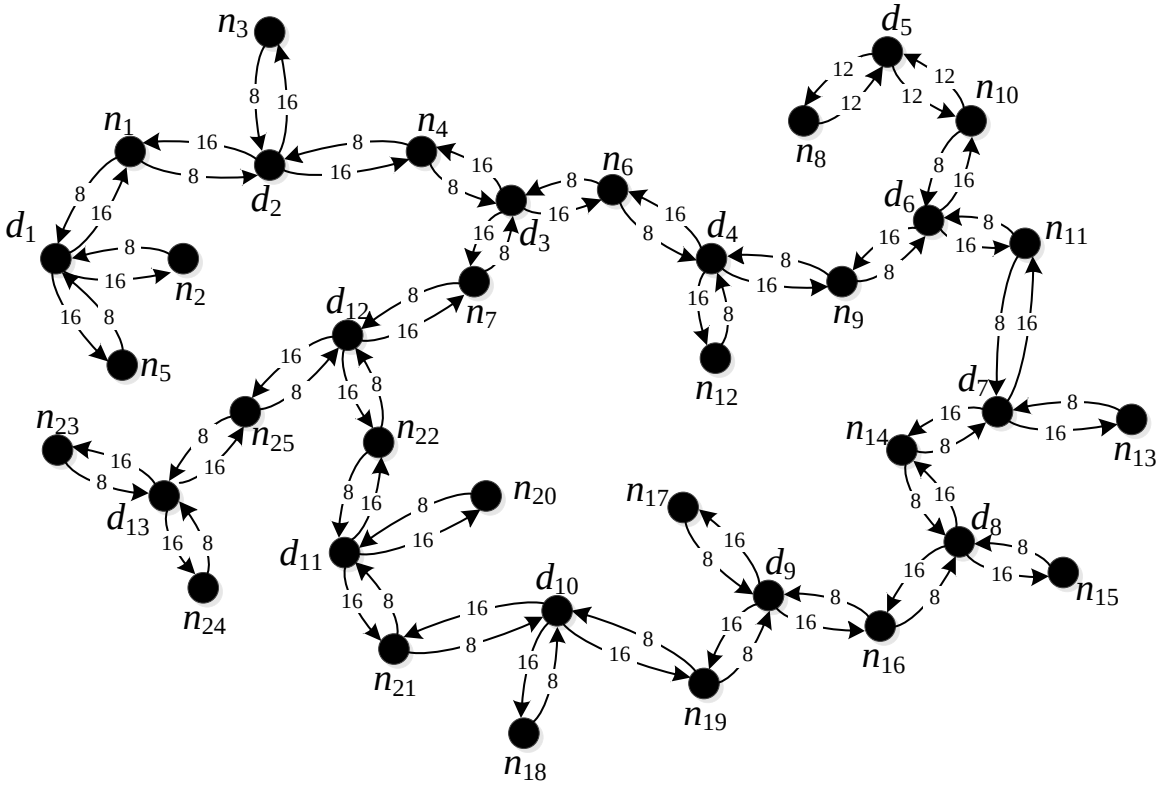

Рис. 6. Плоское кенигово представление конфигурации MR МС WMN, представленной на рис. 5, в виде двудольного ориентированного графа

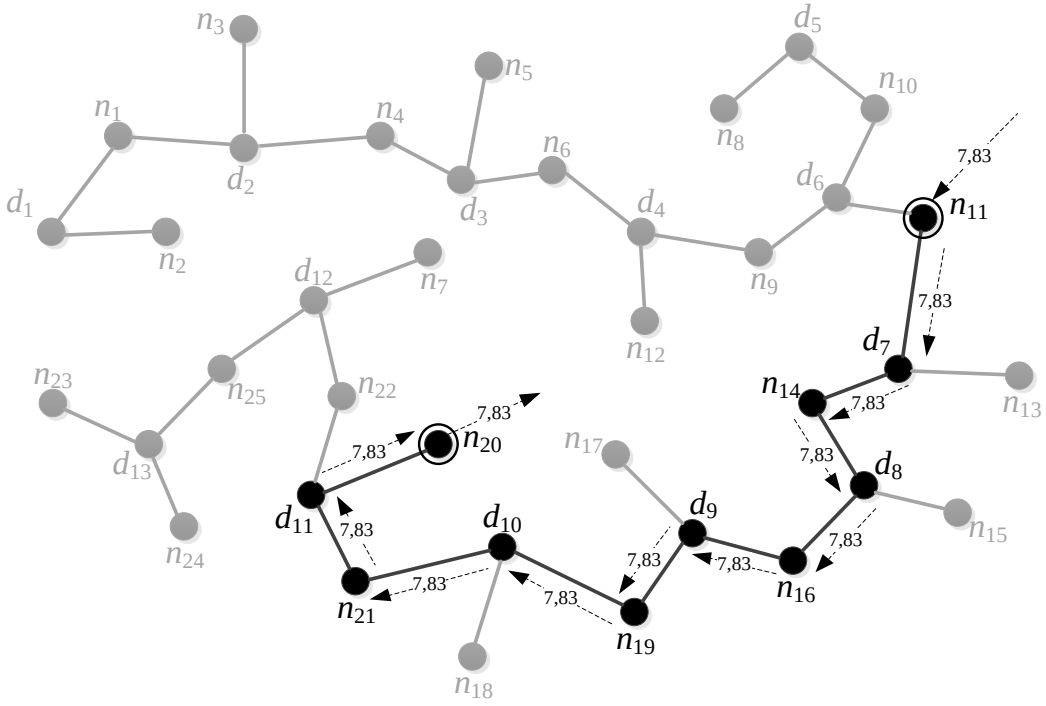

Рис. 7. Пример решения задачи маршрутизации в MR MC WMN при использовании потоковой модели, основанной на плоском кениговом представлении

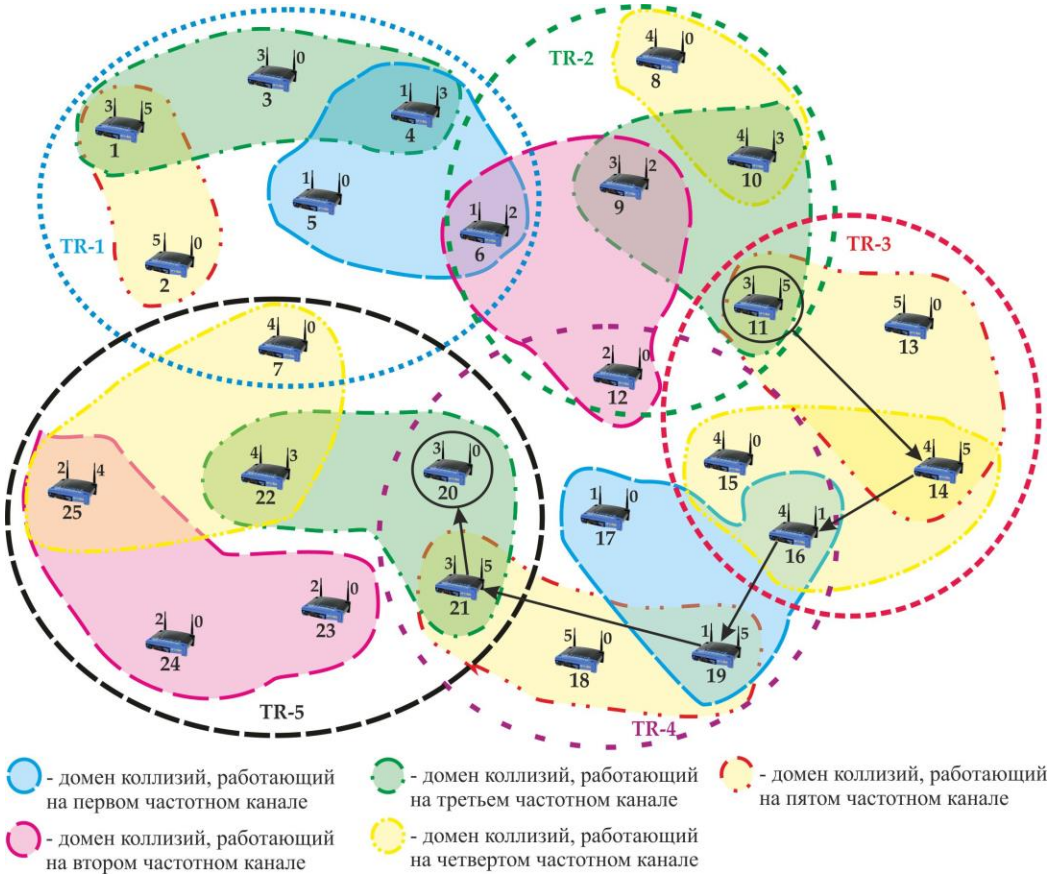

Рис. 8. Пример решения задачи маршрутизации в MR MC WMN

Таким образом, в результате решения задачи многопутевой маршрутизации с использованием потоковой модели (14)-(17), (20)-(23), (26) при условии предварительного решения задачи распределения пяти неперекрывающихся ЧК формировался один маршрут, по которому передавался поток с интенсивностью 7,83 Мбит/с – $n_{11} \to d_7 \to n_{14} \to d_8 \to n_{16} \to d_9 \to n_{19} \to d_{10} \to n_{21} \to d_{11} \to n_{20}$ (рис. 7).

Пример MR MC WMN, получаемой в результате согласованного решения задач распределения неперекрывающихся ЧК и потоковой маршрутизации с использованием предложенной модели (3)-(10), (27)-(29), (32)-(34), (37)-(39), представлен на рис. 9. Указанной конфигурации mesh-сети соответствует гиперграф $G(I,U;Q)$, изображенный на рис. 10, с множеством вершин $I = \{n_1, n_2, \ldots, n_{25}\}$, множеством используемых неперекрывающихся ЧК $T = \{k_1, k_2, \ldots, k_5\}$.

Плоское кенигово представление MR MC WMN (рис. 9) в виде двудольного ориентированного графа, получаемого в результате согласованного решения задач распределения неперекрывающихся ЧК и потоковой маршрутизации с использованием предложенной модели (3)-(10), (27)-(29), (32)-(34), (37)-(39), представлено на рис. 11. В разрывах дуг двудольного ориентированного графа (рис. 11) указаны скорости передачи mesh-станций (Мбит/с) по доменам коллизий, получаемые в соответствии с выражением (28) и (29).

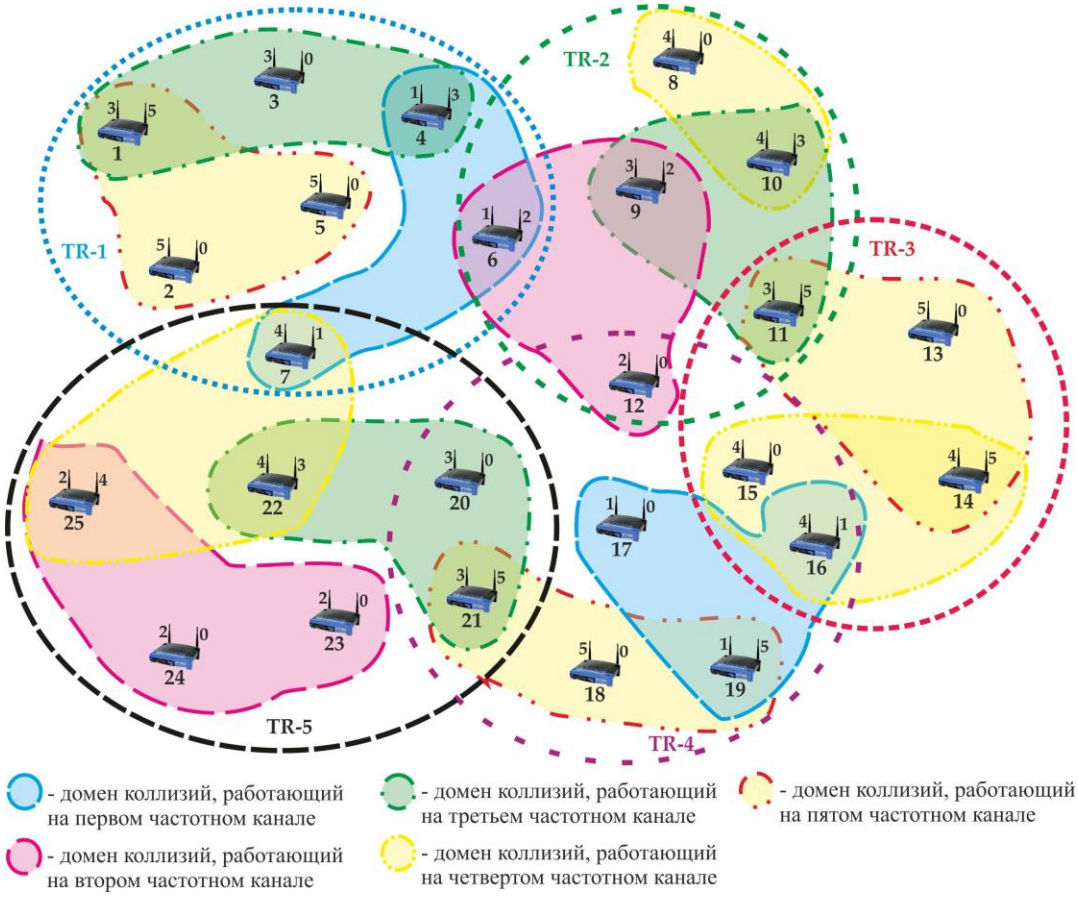

Рис. 9. Пример MR MC WMN, получаемой в результате согласованного решения задач распределения неперекрывающихся ЧК и потоковой маршрутизации

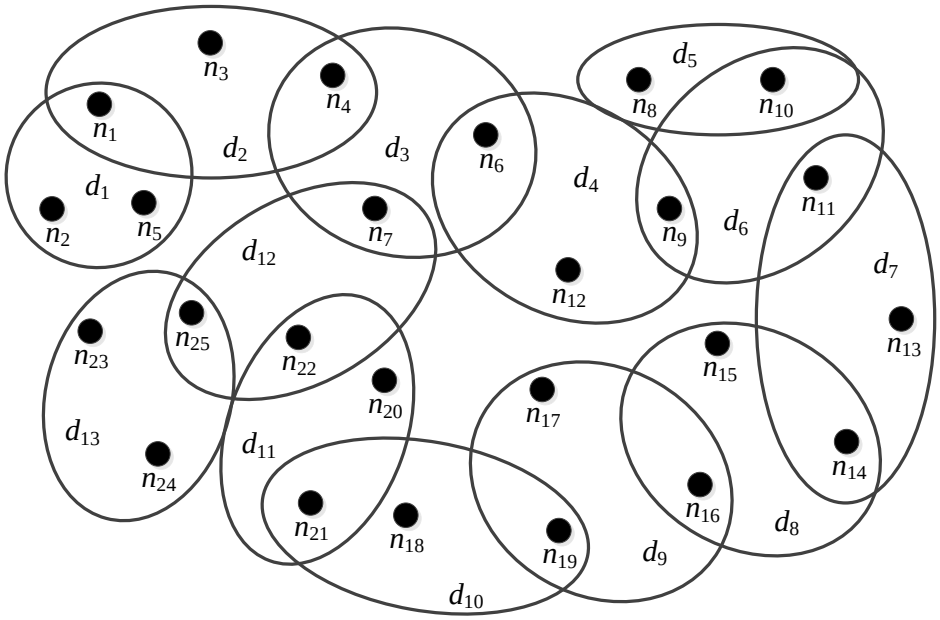

Рис. 10. Гиперграфовое представление MR MC WMN, приведенной на рис. 9

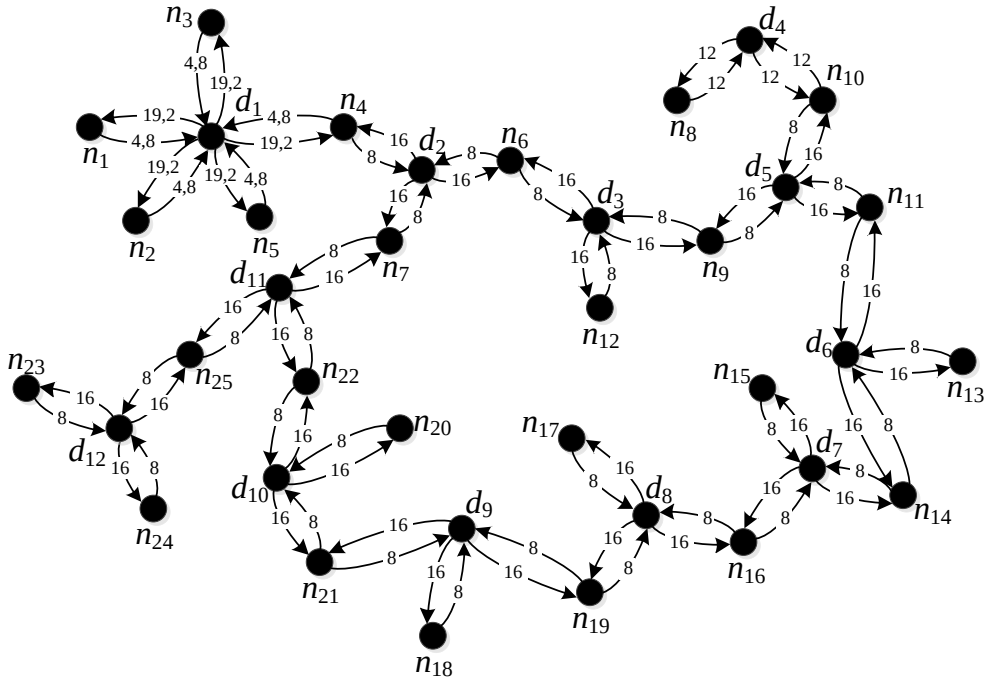

Рис. 11. Плоское кенигово представление MR MC WMN, представленной на рис. 9, в виде двудольного ориентированного графа

На рис. 12 и рис. 13 приведен результат согласованного решения задачи распределения неперекрывающихся ЧК и задачи многопутевой потоковой маршрутизации с использованием модели (3)-(10), (27)-(29), (32)-(34), (37)-(39) при интенсивности потока r =15,83 Мбит/с, поступающего в WMN. Результатом решения являются значения интенсивности потока (Мбит/с), протекающего между mesh-станциями различных доменов коллизий. Значения интенсивностей потоков и их направления по аналогии с рис. 7 указаны на рис. 8 вдоль ребер плоского кенигового представления MR MC WMN.

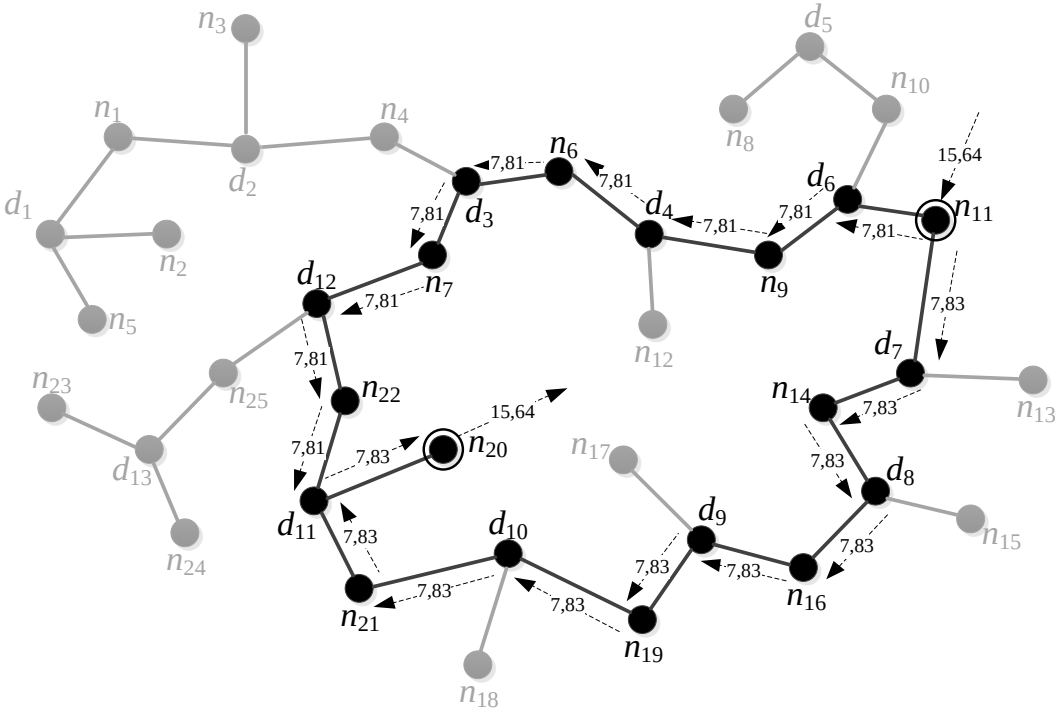

Рис. 12. Пример решения задачи маршрутизации в MR MC WMN при использовании потоковой модели, основанной на плоском кениговом представлении

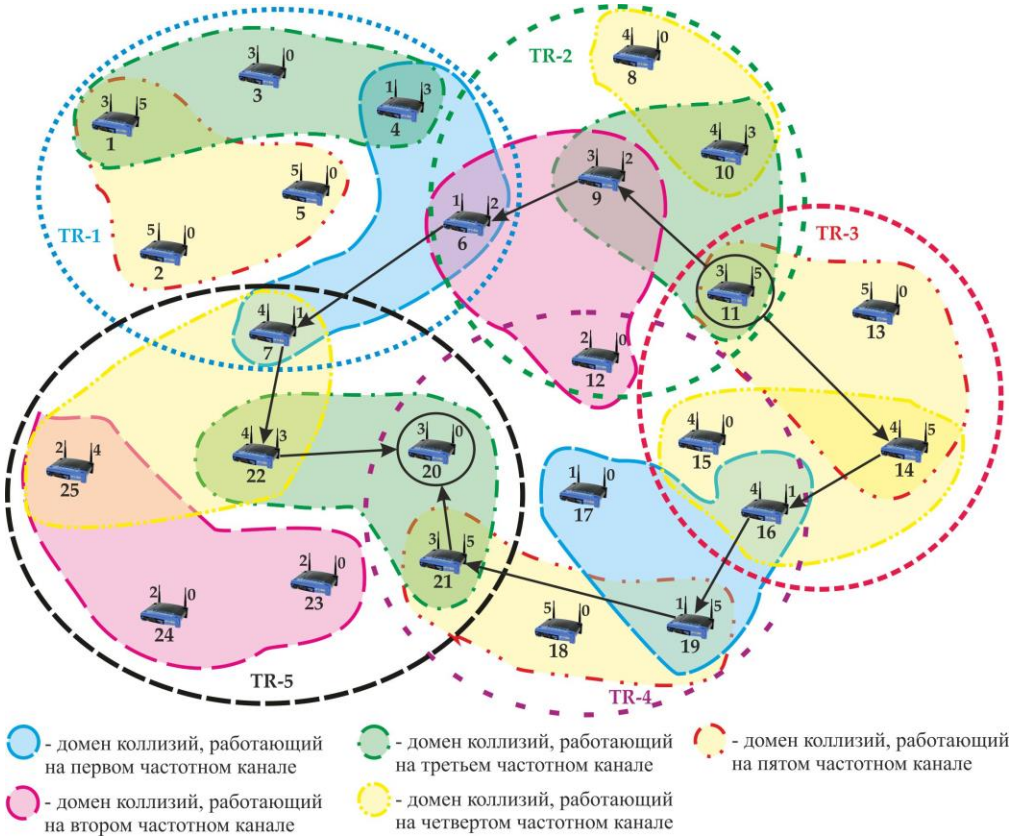

Рис. 13. Пример согласованного решения задач распределения неперекрывающихся ЧК и многопутевой потоковой маршрутизации в MR MC WMN

Таким образом, в результате согласованного решения задач распределения неперекрывающихся ЧК и многопутевой потоковой маршрутизации (3)-(10), (27)-(29), (32)-(34), (37)-(39) формировалось два маршрута (рис. 12):

маршрут 1: $n_{11} \to d_7 \to n_{14} \to d_8 \to n_{16} \to d_9 \to n_{19} \to d_{10} \to n_{21} \to d_{11} \to n_{20}$ – интенсивность потока – 7,83 Мбит/с;

маршрут 2: $n_{11} \to d_6 \to n_9 \to d_4 \to n_6 \to d_3 \to n_7 \to d_{12} \to n_{22} \to d_{11} \to n_{20}$ – интенсивность потока – 7,81 Мбит/с.

В результате проведенного анализа установлено, что использование предложенной в статье модели согласованного решения задач распределения неперекрывающихся ЧК и многопутевой потоковой маршрутизации (3)-(10), (27)-(29), (32)-(34), (37)-(39) позволяет повысить производительность многоканальной многоинтерфейсной mesh-сети. Так, в сравнении с решением, получаемым при последовательном решении задач распределения неперекрывающихся ЧК (2)-(11) и многопутевой потоковой маршрутизации (14)-(17), (20)-(23), (26), результаты которого приведены на рис. 7, согласованное решение указанных задач с использованием модели (3)-(10), (27)-(29), (32)-(34), (37)-(39) позволило увеличить интенсивность потока поступившего на обслуживание почти на 100%.

VII. Анализ выигрыша, получаемого при согласованном решении задачи распределения неперекрывающихся частотных каналов и потоковой маршрутизации

В работе был проведен анализ выигрыша, получаемого при согласованном решении задач распределения различного количества неперекрывающихся ЧК и многопутевой потоковой маршрутизации с использованием модели (3)-(10), (27)-(29), (32)-(34), (37)-(39), по сравнению с последовательным решением указанных задач с использованием моделей (2)-(11) и (14)-(17), (20)-(23), (26). Для проведения анализа использованы примеры конфигураций mesh-сетей, представленных на рис. 14, 16 и 18, имеющие различные степени перекрытия зон устойчивого приема, т.е. различное количество станций, одновременно входящих в состав различных TR. Понятию степени перекрытия зон устойчивого приема соответствует характеристика связности гиперграфа [32]. Гиперграфовое представление указанных примеров конфигураций MR MC WMN представлены соответственно на рис. 15, 17 и 19.

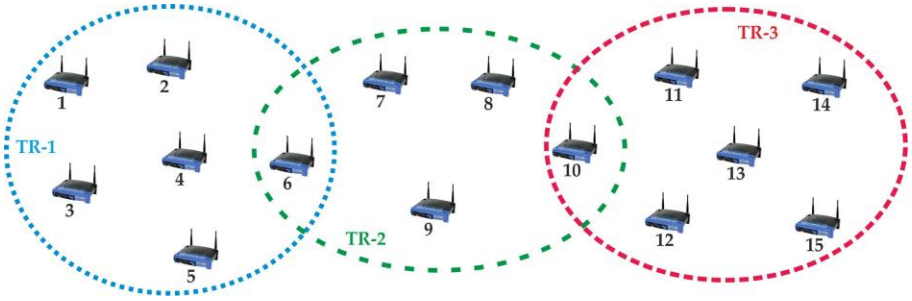

Рис. 14. Пример 1-связной MR MC WMN

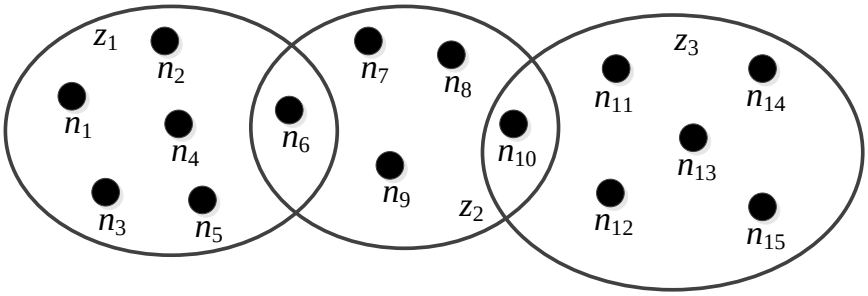

Рис. 15. Гиперграфовое представление 1-связной MR MC WMN

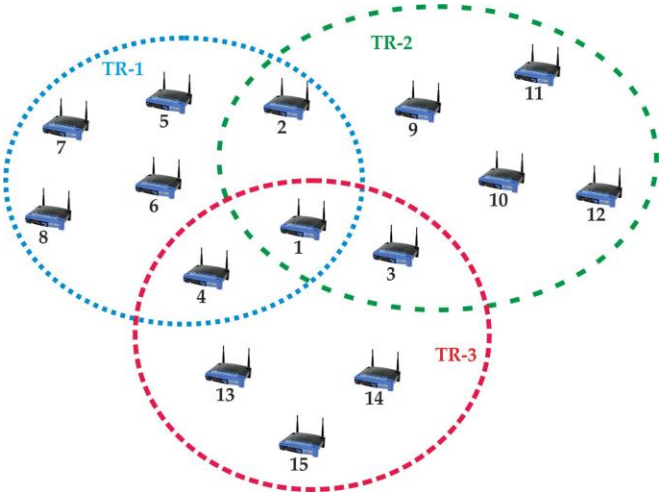

Рис. 16. Пример 3-связной MR MC WMN

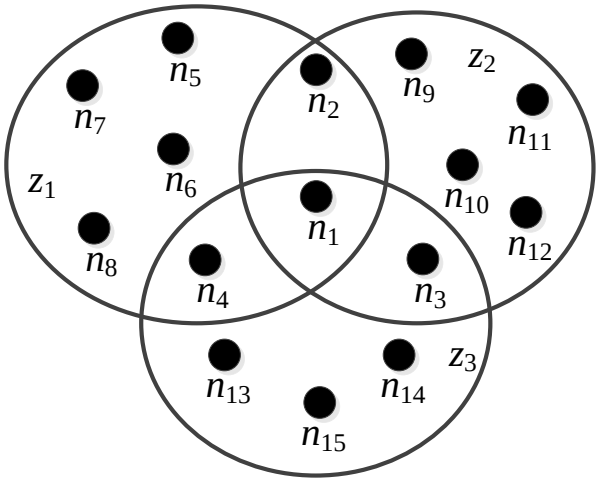

Рис. 17. Гиперграфовое представление 3-связной MR MC WMN

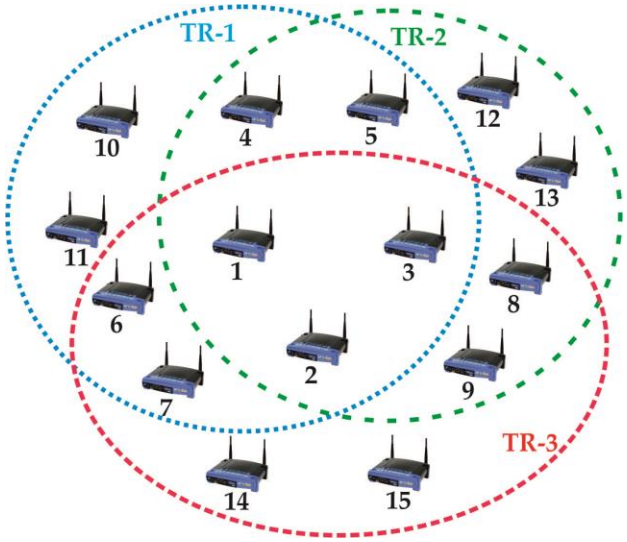

Рис. 18. Пример 7-связной MR MC WMN

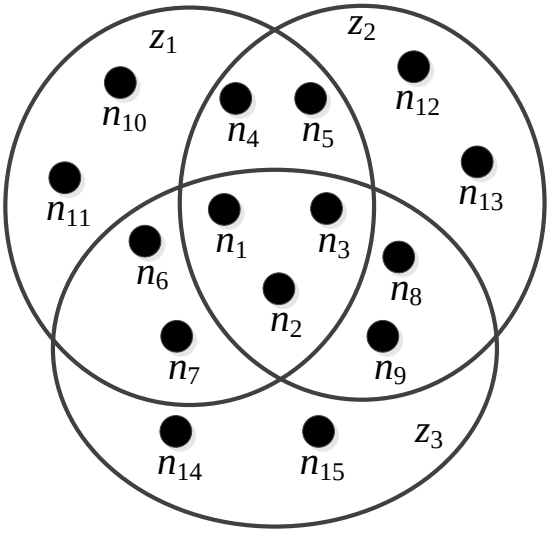

Рис. 19. Гиперграфовое представление 7-связной MR MC WMN

В ходе анализа было использовано различное количество неперекрывающихся ЧК (три, четыре и пять), а максимальная производительность каждого домена кол-

лизий на сетевом уровне составляла 24 Мбит/с. Оценка производительности проводилась между mesh-станциями, принадлежащими различным зонам устойчивого приема. Результаты анализа приведены в табл. 2.

В результате сравнительного анализа установлено, что в случае использования MR MC WMN с уровнем связности равным единице (1-связная mesh-сеть) выигрыш при использовании согласованного решения задач распределения неперекрывающихся ЧК и потоковой маршрутизации отсутствует. Это объяснялось тем, что для древовидной структуры многопутевая маршрутизация не обеспечивает роста производительности сети. В случае использования 3-связной MR MC WMN выигрыш составил 75-100%, а для 7-связной mesh-сети – 80-100% (табл. 2).

Таблица 2. Результаты сравнительного анализа согласованного и последовательного решения задач распределения неперекрывающихся ЧК и потоковой маршрутизации

Связность гиперграфа (MR MC WMN)	Количество используемых неперекрывающихся ЧК	Выигрыш по производительности, %
1-связный	3	0
	4	0
	5	0
3-связный	3	85-100
	4	80-100
	5	75-100
7-связный	3	85-100
	4	83-100
	5	80-100

Также в результате сравнительного анализа установлено, что повышению производительности MR MC WMN способствует увеличение количества радиоинтерфейсов на станциях mesh-сети. Это вызвано тем, что mesh-станция-источник может производить передачу данных одновременно по нескольким доменам коллизий (а в конечном итоге и маршрутам), количество которых соответствует количеству радиоинтерфейсов на ней.

Выводы

Предложена модель согласованного решения задач распределения неперекрывающихся частотных каналов и потоковой маршрутизации в многоканальных многоинтерфейсных mesh-сетях стандарта IEEE 802.11 с использованием гиперграфов и графов Кенига. Если в приведенных ранее решениях задача распределения неперекрывающихся частотных каналов была ориентирована на получение связной сбалансированной по пропускной способности структуры mesh-сети, то в рамках предлагаемой модели решение указанных задач подчинено единой общей цели – повышению межконцевого качества обслуживания по показателям производительности за счет согласованного использования сетевых ресурсов многоканальных многоинтерфейсных mesh-сетей, что особенно проявлялось при увеличении степени перекрытия зон

устойчивого приема, числа радиоинтерфейсов на mesh-станциях и количества поддерживаемых неперекрывающихся частотных каналов в сети. В результате сравнительного анализа последовательного и предложенного согласованного решения задач распределения неперекрывающихся частотных каналов и потоковой маршрутизации установлено, что согласованное решение указанных задач с использованием предложенной модели позволяет на 75-100 % увеличить производительность MR MC WMN.

Список литературы:

1. *Raniwala A.* Centralized channel assignment and routing algorithms for multi-channel wireless mesh networks / A. Raniwala, K. Gopalan, T. Chiueh // ACM Mobile Computing and Communications Review – 2004. – Vol. 8. – P. 50-65.

2. *Chiang M.* Balancing Transport and Physical Layers in Wireless Multihop Networks: Joint Optimal Congestion and Power Control / M. Chiang // IEEE Journal on Selected Areas in Commun – Vol. 23, No. 1. – 2005. – P. 104-116.

3. *Skalli H.* Channel Assignment Strategies for Multiradio Wireless Mesh Networks: Issues and Solutions / H. Skalli, S. Ghosh, S.K. Das, L. Lenzini, M. Conti // IEEE Comm. Magazine – 2007. – Vol. 45, No. 11 – P. 86-95.

4. *Akyildiz I.F., Wang X., Wang W.* Wireless mesh networks: a survey // Computer Networks. – 2005. – Vol. 47, No.2. – P.445–487.

5. *Пустогаров И.А., Ляхов А.И., Шпилев С.А.* Многоканальные mesh-сети: анализ подходов и оценка производительности [Электронный ресурс] // Информационные процессы (Information processes). – 2008. – Том 8 (3). – С. 173-192. – Режим доступа к журн.: http://www. jip.ru/2008/173-192-2008.pdf.

6. *Гоголева М.А., Гаркуша С.В., Ахмед Х. Абед.* Экспериментальное исследование математической модели распределения каналов в многоканальных mesh-сетях стандарта IEEE 802.11 // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2010. – Вып. 163. – С. 99-107.

7. *Raniwala A., Tzi-cker Chiueh.* Architecture and algorithms for an IEEE 802.11-based multichannel wireless mesh network // Proc. of INFOCOM. – 2005. – Vol.3. – P. 2223- 2234.

8. *Valarmathi K., Malmuruga N.* Joint design of congestion control routing with distributed multi-channel assignment in wireless mesh networks // International Journal of Computer Science and Information Security (IJCSIS). – 2010. – Vol. 7, No. 3. – P. 261–266.

9. *Petroulakis N., Delakis M., Genetzakis M., Dionysiou T., Papadakis S., Siris V.* Demonstration of Channel Assignment in a Wireless Metropolitan MESH Network // IEEE International Symposium on a World of Wireless Mobile and Multimedia Networks Workshops (WOWMOM). –2009. – P. 1–3.

10. *Da Silva M.M.R.*, De Rezende J.F. TDCS: A new mechanism for automatic channel assignment for independent IEEE 802.11 networks // 8th IFIP Annual Mediterranean Ad Hoc Networking Workshop. – 2009. – P. 27–33.

11. *Lyakhov A., Pustogarov I., Gudilov A.* IEEE 802.11 Direct Links: Interference Classification and Modeling // Revised Selected Papers From Int. Workshop of Multiple Access Communications (MACOM 2008), 16-17th June 2008. – Saint-Petersburg, Russia, 2008. – P. 15–24.

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

13. *Лемешко А.В., Гоголева М.А.* Трехиндексная математическая модель распределения частотных каналов в многоканальных mesh-сетях // Збірник наукових праць «Моделювання та інформаційні технології». – Київ, 2009. – №54. – С. 94 – 103.

14. *Gogolieva M., Garkusha S., Abed A.H.* A mathematical model of channel distribution in multi-channel mesh networks 802.11 // 11th International Conference The Experience of Designing and Application, CAD Systems in Microelectronics (CADSM). – 2011. – P. 71–73.

15. *Das A.K., Alazemi H.M.K., Vijayakumar R., Roy S.* Optimization models for fixed channel assignment in wireless mesh networks with multiple radios // IEEE SECON. – 2005. – P. 463–474.

16. *Naveed A., Salil S. Kanhere, Sanjay K. Jha.* Topology control and channel assignment in multi-radio multi-channel wireless mesh networks // Proc. of MASS. – 2007. – P. 1-9.

17. *Haidar M., Al-Rizzo H., Chan Y., Akl R., Bouharras M.* Throughput validation of an advanced channel assignment algorithm in IEEE 802.11 WLAN // International Conference on Communication Software and Networks. – 2009. – P. 801–806.

18. *Ko B., Misra V., Padhye J., Rubenstein D.* Distributed channel assignment in multi-radio 802.11 mesh networks // Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). – 2007. – P. 58–72.

19. *Raniwala A., Gopalan K., Chiueh T.* Centralized channel assignment and routing algorithms for multi-channel wireless mesh networks // ACM Mobile Computing and Communications Review. – 2004. – Vol.8. – P. 50–65.

20. *Bahl P., Chandra R., Dunagan J.* SSCH: slotted seeded channel hopping for capacity improvement in IEEE 802.11 Ad-Hoc wireless networks // Proc. of ACM Mobicom. – 2004. – P. 216–230.

21. *Kyasanut P., Vaidya N.* Routing and interface assignment in multi-channel multi-interface wireless networks // Proc. of IEEE Conf. Wireless Commun. – 2005. – Vol.4. – P. 2051–2056.

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

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

24. *Гаркуша С.В.* Огляд та класифікація протоколів маршрутизації в mesh-мережах стандарту IEEE 802.11 // Збірник наукових праць ВІТІ НТУУ „КПІ" – 2012 – № 1 – С. 14-23.

25. *Гоголева М.А.* Классификация и анализ методов маршрутизации в mesh-сетях/ М.А. Гоголева // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2008. – Вып. 155. – С. 173-185.

26. *Singh K.* Review on Routing Protocols in Wireless Mesh Networks / K. Singh, S. Behal // International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management (IJAIEM). – 2013. – Vol. 2, Iss. 2. – P. 143-149.

27. *Поповский В.В., Лемешко А.В., Евсеева О.Ю.* Симплициальная модель оценки структурной сложности телекоммуникационных систем // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2003. – Вып 5 (5). – С. 48-51.

28. *Лемешко А.В.* Оценивание структурного разнообразия телекоммуникационных систем, представленных симплициальными моделями, по информационным показателям // Праці УНДІРТ. Випуск №2 (38). – Одеса: Видання УНДІРТ, 2004. – С. 77-79.

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

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

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

32. *Гаркуша С.В.* Особенности использования гиперграфов при моделировании многоканальных mesh-сетей стандарта IEEE 802.11 / С.В. Гаркуша // Радиотехника. Всеукр. межвед. научн.-техн. сб. – 2013. – Вып. 175. – С. 160-169.

33. *Garkusha S., Garkusha O., Abed A. H.* Features of Use of Hypergraphs in the Simulation of Multi-Channel Mesh-Networks IEEE 802.11// Proceedings of the XII International Conference Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications, and Computer Science (TCSET'2014), Lviv-Slavske, February 25 – March 1, 2014. – Lviv-Slavske, Ukraine, 2014. – pp. 510-512.

34. *Гаркуша С.В.* Разработка потоковой модели маршрутизации в многоканальных многоинтерфейсных mesh-сетях стандарта IEEE 802.11, представленных в виде графа Кенига [Електронний ресурс] //Проблеми телекомунікацій. – 2014. – № 1 (13). – С. 20-34. – Режим доступу до журн.:http://pt.journal.kh.ua/2014/1/1/141_garkusha_routing.pdf .

35. *Гаркуша С.В.* Анализ результатов распределения частотных каналов в многоканальных многоинтерфейсных mesh-сетях стандарта IEEE 802.11 // Цифрові технології: Зб. наукових праць. – 2011. – Вып. 10. – С. 27-42.

36. *Гаркуша С.В.* Сравнительный анализ критериев оптимальности распределения частотных каналов в mesh-сети IEEE 802.11 / С.В. Гаркуша, Е.В. Гаркуша // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2012. – Вип. 4(24) – С. 125-131.

37. *Seok Yo., Lee Yo., Choi Ya.* Dynamic constrained multipath routing for MPLS networks // Proc. of IEEE ICCCN. Scottsdale. – 2001. – Vol.2., №1. – P. 348-353.

38. *Wang Y., Wang Z.* Explicit routing algorithms for Internet Traffic Engineering // Proc. of 8th International Conference on Computer Communications and Networks. Paris, 1999. – P. 582-588.

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

40. Recommendation ITU-R M.1450-4. Characteristics of broadband radio local area networks. – Geneva: ITU-T, 2010.