

**АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТОТНЫХ КАНАЛОВ В МНОГО-КАНАЛЬНЫХ МНОГОИНТЕРФЕЙСНЫХ MESH-СЕТЯХ СТАНДАРТА IEEE 802.11**

ГАРКУША С.В.

Харьковский национальный университет радиоэлектроники

**ANALYSIS THE RESULTS DISTRIBUTION OF FREQUENCY CHANNEL MULTI-RADIO MULTI-CHANNEL IN MESH NETWORKING STANDARD IEEE 802.11**

GARKUSHA S.V.

Kharkiv national university of radioelectronics

***Аннотация.** В статье представлена двухиндексная модель распределения частотных каналов в многоканальных mesh-сетях стандарта IEEE 802.11. Проанализировано влияние территориального разнесения станций и технологических характеристик многоинтерфейсных многоканальных mesh-сетей от качества решения задачи распределения частотных каналов*

***Abstract.** The article introduces a double index model of the distribution frequency channels in the multiradio multichannel mesh-networking standard IEEE 802.11. Analyzed the influence of stations territorial separation and technological characteristics of multi-radio multi-channel mesh networking upon the quality of the distribution frequency channels problem solution*

**ВВЕДЕНИЕ**

В многошаговых (multi-hop) беспроводных mesh-сетях (Wireless Mesh Networks, WMN) управление различными видами ресурсов (например, радио ресурсом – управление мощностью передатчиков, частотным ресурсом – выбор частотного канала, сетевым ресурсом – маршрутизация и т.д.) имеет огромное влияние на производительность всей сети в целом. Например, управление мощностью передатчиков беспроводных станций позволяет влиять на топологию беспроводной mesh-сети, уровень помех, а также качество беспроводной связи. Использование многоканального (Multi-Channel, MC) многоинтерфейсного (Multi-Radio, MR) режима работы mesh-сети, совместно с соответствующим механизмом распределения частотных каналов (ЧК) может повысить общую производительность WMN. Различные механизмы маршрутизации позволяют выбрать путь между двумя станциями WMN оптимизированный по определенному показателю производительности (например, минимум задержки при передаче сообщений, максимум пропускной способности канала связи, минимум количества переприемов и т.д.).

Для эффективного управления WMN, необходимо одновременно учитывать все виды ресурсов (радио, частотные, сетевые и т.д.). Тем не менее, достичь эффективного решения в таких условиях достаточно сложно, т. к. управление одним типом ресурсов в значительной степени влияет на управление другими ресурсами. Это требует глобальных сведений о состоянии WMN, таких как информация о передвижении станций и текущее состояние каналов связи. Во многих случаях организовать сбор такой информации в режиме реального времени достаточно сложно, поскольку она изменяется достаточно динамично. Более практичным подходом является обеспечение управления отдельными видами ресурсов. Поэтому в рамках данной статьи основное внимание будет уделено решению задачи распределения неперекрывающихся ЧК между радиоинтерфейсами (РИ) станций в MR-MC WMN.

Сегодня известно достаточно большое количество подходов к решению задачи распределения ЧК в MR-MC WMN [1-18]. Однако многие из известных результатов, как показано в работе [19], не лишены недостатков. К таким недостаткам, в первую очередь, необходимо отнести отсутствие согласованности в решении подзадач кластеризации, закрепление РИ и

выделение им соответствующих ЧК, а также недостаточный учет аппаратурных и технологических особенностей построения MR-МС WMN стандарта IEEE 802.11, территориальной удаленности и активности mesh-станций. В этой связи в статье предлагается двухиндексная математическая модель распределения ЧК в MR-МС WMN, функционирующая на основе стека стандартов IEEE 802.11 a/b/g/n/s, а также проведен ее анализ с точки зрения учета различных технологических и территориальных особенностей построения MR-МС WMN.

## 1. ДВУХИНДЕКСНАЯ МОДЕЛЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТОТНЫХ КАНАЛОВ В МНОГОКАНАЛЬНОЙ MESH-СЕТИ

С целью графического отображения результатов решения задачи распределения ЧК в MR-МС WMN был использован ряд условных обозначений (рис. 1), введенный в работе [20].

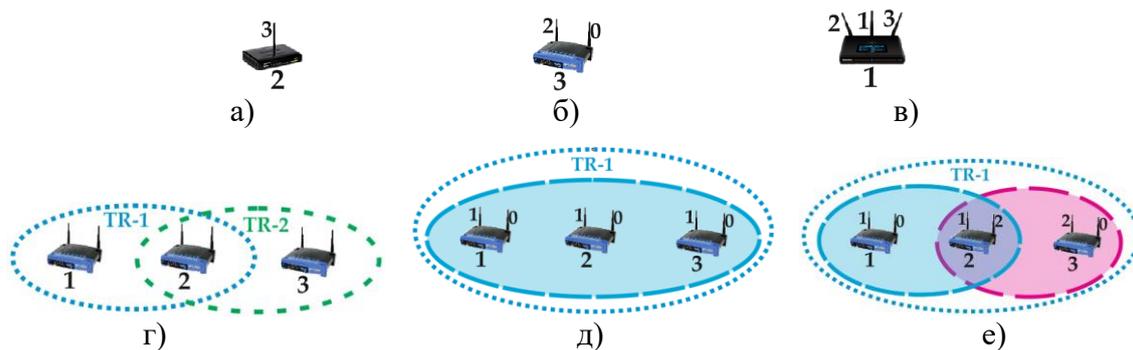


Рис. 1. Примеры условных обозначений элементов mesh-сети

Обозначение, представленное на рис. 1 а), говорит о том, что mesh-станция №2, использует один РИ, за которым закреплен третий ЧК. Если, например, mesh-станция №3 использует два РИ (за первым РИ закреплен второй ЧК, а второй РИ не используется), то применяются обозначение рис.1 б). На рис.1 в) представлено обозначение mesh-станции №1, которая использует три РИ: за первым РИ закреплен второй ЧК, за вторым – первый ЧК, а за третьим – третий ЧК. На рис.1 г) представлен вариант обозначения ситуации, когда mesh-станции №1 и №2 находятся в первой зоне устойчивого приема (TR-1), а mesh-станции №2 и №3 находятся во второй зоне устойчивого приема (TR-2), т.е. mesh-станции №1 и №3 не могут производить непосредственный обмен данными друг с другом. В случае, когда mesh-станции №1, №2 и №3 находятся в одной зоне устойчивого приема (TR-1) и образуют один домен коллизий, работая друг с другом на первом ЧК будет использоваться обозначение рис.1 д). На рис.1 е) приведено обозначение mesh-станций №1, №2 и №3, которые находятся в одной зоне устойчивого приема (TR-1), причем mesh-станции №1 и №2 образуют один домен коллизий, работая друг с другом на первом ЧК, а mesh-станции №2 и №3 образуют второй домен коллизий, работая друг с другом на втором ЧК.

Также в рамках данной работы будет использовано понятие зоны устойчивого приема (Transmission Range, TR) [3, 9-11, 19, 20]. Заметим, что зона устойчивого приема образуется множеством mesh-станций максимальной мощности, которые могут обмениваться информацией (пакетами) с использованием выбранной в mesh-сети технологии беспроводной связи. В двухиндексной математической модели [20] для решения задачи распределения ЧК между РИ станций MR-МС WMN в качестве исходных использованы следующие данные:

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

2)  $K$  – общее количество неперекрывающихся ЧК используемых в mesh-сети (в технологии IEEE 802.11b/g доступно 3÷4 неперекрывающихся ЧК, а в технологии IEEE 802.11a – 12 неперекрывающихся ЧК);

3)  $\{G_{z,z=\overline{1,Z}}\}$  – множество зон устойчивого приема, где  $Z$  – общее количество зон устойчивого приема в mesh-сети,  $|G_z|$  – мощность  $z$ -го подмножества, т.е. число mesh-станций, входящих в состав  $z$ -й TR;

4)  $m_n^*$  – целочисленный параметр, характеризующий минимально необходимое число неперекрывающихся ЧК, выделенных для  $n$ -й mesh-станции. Как правило, данный параметр равен единице;

5)  $m_n$  – число поддерживаемых радиointерфейсов на  $n$ -й mesh-станции, которое, как правило, равно  $1 \div 3$ .

Для учета территориальной удаленности станций mesh-сети в двухиндексной математической модели использовано понятие матрицы зон устойчивого приема или TR-матрицы [9, 20]. TR-матрица является прямоугольной, количество строк которой соответствует числу зон устойчивого приема  $Z$ , а число столбцов соответствует общему числу mesh-станций  $N$  в сети, и имеет вид

$$D = \|d_{z,n}\|, (z = \overline{1,Z}; n = \overline{1,N}),$$

где  $d_{z,n} = \begin{cases} 1, & \text{если } n\text{-я станция принадлежит } z\text{-й TR;} \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$

На рис. 2 приведен пример mesh-сети с указанием числа зон устойчивого приема.

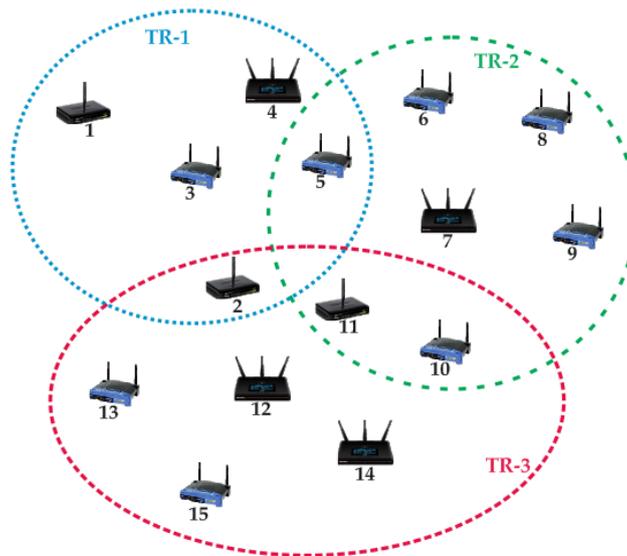


Рис. 2. Пример mesh-сети с указанием зон устойчивого приема при  $Z = 3$  и  $N = 15$

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

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

В работе [20] с целью указания топологических и функциональных параметров возможной конфигурации mesh-сети было использовано обозначение  $N|Z|M|K$ , где  $N$  – общее число станций, используемых в mesh-сети,  $Z$  – число зон устойчивого приема, образующихся этими станциями,  $M$  – множество РИ, используемых на каждой отдельной станции mesh-сети,  $K$  – множество неперекрывающихся ЧК в MR-МС WMN.

Множество  $M$  может состоять из единственного элемента, например  $M = \{2\}$  в случае, если, число РИ, поддерживаемых всеми станциями mesh-сети, одинаково (однородная mesh-сеть) и равно двум. Множество  $M$  также может быть представлено несколькими элементами, например  $M = \{1,2,3\}$ , если число РИ на станциях mesh-сети различно (неоднородная mesh-сеть), т.е. на некоторых станциях имеется лишь один РИ, на некоторых поддерживается два РИ, а на некоторых – три РИ. Таким образом, обозначение возможной конфигурации mesh-сети, представленной на рис. 2, примет вид  $15 | 3 | \{1,2,3\} | \{3\}$ .

Решение задачи распределения ЧК между РИ станций mesh-сети с использованием двухиндексной математической модели сводится к поиску булевой переменной:

$$x_{n,k} \in \{0,1\} \quad (n = \overline{1,N}; k = \overline{1,K}), \quad (1)$$

где  $x_{n,k} = \begin{cases} 0, & \text{если } n\text{-я станция не работает на } k\text{-м ЧК;} \\ 1, & \text{если } k\text{-й ЧК на } n\text{-й mesh-станции закреплён только за одним из РИ.} \end{cases}$

Результатом расчета переменных (1) является формирование связанных между собой доменов коллизий, в рамках которых станции работают на одном и том же ЧК. В связи с этим в ходе решения задачи распределения ЧК необходимо выполнить ряд важных условий:

1. Условие включения  $n$ -й mesh-станции в сеть:

$$\sum_{k=1}^K x_{n,k} \geq m_n^* \quad (n = \overline{1,N}), \quad (2)$$

где  $1 \leq m_n^* \leq m_n$ ,  $\sum_{k=1}^K x_{n,k}$  – количество ЧК, выделенных для работы одной mesh-станции.

2. Условие выделения  $n$ -й mesh-станции количества частотных каналов, не превышающего количества ее РИ:

$$\sum_{k=1}^K x_{n,k} \leq m_n \quad (n = \overline{1,N}). \quad (3)$$

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

$$\sum_{k=1}^K [x_{n,k} x_{s,k}] \leq 1, \quad (\text{для } (n,s)\text{-пары станций; } n,s = \overline{1,N}; n,s \in G_z; z = \overline{1,Z}), \quad (4)$$

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:

$$x_{n,k} \leq \sum_{\substack{s=1 \\ s \neq n}}^N x_{s,k} \quad (n,s \in G_z; z = \overline{1,Z}; k = \overline{1,K}), \quad (5)$$

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

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

$$d_{z,n} d_{q,n} x_{n,k} \sum_{\substack{s \in G_z \\ s \notin G_q}} x_{s,k} \sum_{\substack{r \in G_q \\ r \notin G_z}} x_{r,k} = 0 \quad (6)$$

при условии, что  $n = \overline{1, N}$ ;  $k = \overline{1, K}$ ;  $z, q = \overline{1, Z}$ ;  $z \neq q$ ;  $n \neq s \neq r$ .

6. Условие связности mesh-станций и доменов коллизий в каждой зоне устойчивого приема:

$$\sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N x_{n,k} \geq |G_z| + K - 1 - b \quad (z = \overline{1, Z}; n \in G_z), \quad (7)$$

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

Выражение  $INT\left(\sum_{n=1}^N m_n / 2\right)$  в условии-ограничении (7) определяет максимальное число неперекрывающихся ЧК, которые могут быть включены на РИ станций mesh-сети. Выполнение условия (7) гарантирует, что количество используемых ЧК в  $z$ -й зоне устойчивого приема может быть распределено между РИ mesh-станций входящих в ее состав.

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

$$\sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N (d_{z,n} d_{q,n} x_{n,k}) \geq \sum_{n=1}^N (d_{z,n} d_{q,n}) + 1 \quad (z, q = \overline{1, Z}; z \neq q), \quad (8)$$

где  $\sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N (d_{z,n} d_{q,n} x_{n,k})$  – число включенных РИ на mesh-станциях, которые находятся на пересечении зон устойчивого приема  $G_z$  и  $G_q$ ;  $\sum_{n=1}^N (d_{z,n} d_{q,n})$  – число mesh-станций, находящихся на пересечении зон устойчивого приема  $G_z$  и  $G_q$ .

8. Условие того, что одна из множества mesh-станций, находящихся на пересечении нескольких зон устойчивого приема и работающих не менее чем на двух ЧК, должна работать на этих ЧК в разных зонах устойчивого приема:

$$\begin{cases} d_{z,n} d_{q,n} x_{n,k} x_{n,h} \left( \sum_{s=1}^N (d_{z,s} x_{s,k}) + \sum_{s=1}^N (d_{z,s} x_{s,h}) \right) \left( \sum_{r=1}^N (d_{q,r} x_{r,k}) + \sum_{r=1}^N (d_{q,r} x_{r,h}) \right) > 0; \\ d_{z,s} d_{q,s} = 0; \\ d_{z,r} d_{q,r} = 0. \end{cases} \quad (9)$$

при условии, что  $k, h = \overline{1, K}$ ;  $k \neq h$ ;  $z \neq q$ ;  $n \neq s \neq r$ . Например, выполнение условия  $d_{z,s} \cdot d_{q,s} = 0$  означает то, что  $s$ -я станция не находится на пересечении зон устойчивого приема  $G_z$  и  $G_q$ .

Совместное выполнение условий (6)-(9) гарантирует, что число включенных РИ обеспечит связность многоканальной mesh-сети, которая в свою очередь определяется как связность создаваемых доменов коллизий друг с другом. При этом два домена коллизий считаются связными, если в рамках одной зоны устойчивого приема существует mesh-станция, которая работает на ЧК этих доменов коллизий.

Исходя из результатов, представленных в работах [9, 20] установлено, что производительность создаваемого домена коллизий прямо пропорциональна числу mesh-станций входящих в его состав. Поэтому решение задачи распределения ЧК должно быть сбалансированным относительно числа mesh-станций входящего в состав того или иного домена коллизий. С этой целью в математическую модель было введено условие балансировки числа mesh-станций по создаваемым доменам коллизий

$$\sum_{n=1}^N (d_{z,n} x_{n,k}) \leq \alpha \text{ (для каждой } (z,k)\text{-пары; } z = \overline{1, Z}; k = \overline{1, K}), \quad (10)$$

где в левой части неравенства представлено число mesh-станций в  $z$ -й TR работающих на  $k$ -м ЧК,  $\alpha$  – верхний динамически управляемый порог числа mesh-станций в произвольно выбранном домене коллизий в многоканальной mesh-сети.

Расчет искоемых управляющих переменных (1) и параметра  $\alpha$  целесообразно производить в ходе решения оптимизационной задачи при выполнении условий-ограничений (2)-(10). При выборе критерия оптимальности необходимо учитывать тот факт, что количество станций в mesh-сетях значительно преобладает над числом неперекрывающихся ЧК. Также при этом существует необходимость решения таких проблем как минимизация уровня интерференции, повышение уровня связности mesh-сети и устранение эффекта «скрытой» станции [9]. В результате проведенных исследований [20] в качестве критерия оптимальности, удовлетворяющего вышеперечисленным требованиям, был выбран минимум числа работающих mesh-станций в создаваемых доменах коллизий

$$\min_{x, \alpha} \alpha. \quad (11)$$

Использование данного критерия способствует повышению общей производительности многоканальной mesh-сети [8].

С точки зрения физики процессов, протекающих в многоканальной mesh-сети, задача распределения частотных каналов в MR-МС WMN в постановке (1)-(11) относится к классу задач балансировки сетевых (частотных) ресурсов, а с математической точки зрения – это задача смешанного целочисленного нелинейного программирования (Mixed Integer NonLinear Programming, MINLP). В предложенной математической модели искоемые переменные  $x_{n,k}$  (1) являются булевыми, минимизируемая переменная  $\alpha$  является целочисленной, а ограничения на искомые переменные носят как линейный (1)-(3), (5), (7)-(10), так и нелинейный (4), (6) характер.

Определение уровня адекватности предложенной математической модели, а также эффективности ее использования для решения сформулированной задачи должно производиться исходя из результатов оценки качества получаемых решений по распределению ЧК в MR-МС WMN. Поэтому далее будет проведен анализ результатов решения задачи распределения ЧК в MR-МС WMN с целью определения зависимости качества полученных решений от различных характеристик mesh-сети.

## 2. АНАЛИЗ РЕШЕНИЙ ЗАДАЧИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТОТНЫХ КАНАЛОВ В МНОГОКАНАЛЬНОЙ MESH-СЕТИ СТАНДАРТА 802.11

С целью оценки качества получаемых решений при распределении ЧК в рамках предложенной модели (1)-(11) проанализируем их зависимость от следующих исходных данных:

- характеристик mesh-сети (общее число станций в mesh-сети, число радиointерфейсов на станциях mesh-сети);
- используемых технологий беспроводной связи (число используемых неперекрывающихся частотных каналов);

- территориального разнесения станций mesh-сети (степень перекрытия зон устойчивого приема, неоднородность зон устойчивого приема mesh-сети, размер зоны устойчивого приема).

## 2.1. ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ПОЛУЧАЕМЫХ РЕШЕНИЙ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РАЗЛИЧНОГО ЧИСЛА НЕПЕРЕКРЫВАЮЩИХСЯ ЧАСТОТНЫХ КАНАЛОВ

В рамках проведенных исследований были проанализированы различные конфигурации многоканальных многоинтерфейсных mesh-сетей. С целью демонстрации результатов решения задачи распределения ЧК в mesh-сети при использовании различного количества неперекрывающихся ЧК была использован пример возможной конфигурации неоднородной mesh-сети  $15|3|\{1,2,3\}|\{3\}$ , представленной на рис. 3.

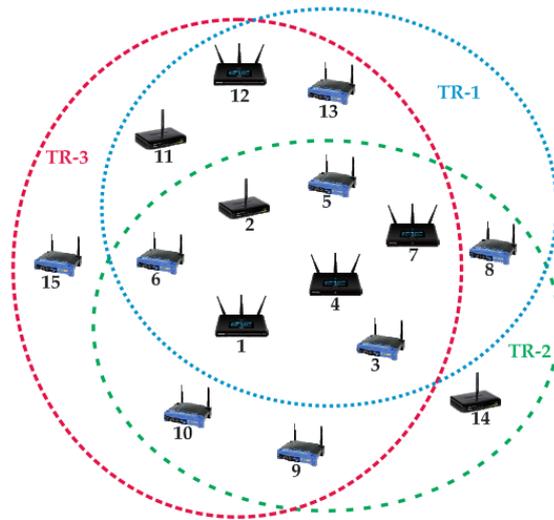


Рис. 3. Возможная конфигурация mesh-сети  $15|3|\{1,2,3\}|\{3\}$

Результаты решения задачи распределения ЧК с использованием различного числа неперекрывающихся ЧК представлены на рис. 4.

Из приведенного примера видно, что в случае использования трех ЧК (рис. 4 а) максимальный размер создаваемых доменов коллизий составил шесть станций. Увеличение числа используемых ЧК до четырех (рис. 4 б) позволяет снизить максимальный размер создаваемых доменов коллизий до пяти mesh-станций. Из результата, представленного на рис 3 в, видно, что в случае использования пяти ЧК mesh-сеть разбивается на пять доменов коллизий, максимальный размер которых не превышает четырех станций.

Также были проведены исследования, направленные на определение зависимости производительности направления связи между двумя станциями mesh-сети от используемого критерия оптимальности. При этом производительность того или иного направления связи определяется производительностью самого низкоскоростного (наиболее размерного) домена коллизий, через который оно проходит. Производительность домена коллизий, работающего на  $k$ -ом ЧК ( $\Pi_{z,k}$ ) определялась с использованием следующего выражения:

$$\Pi_{z,k} = \frac{\Pi}{\sum_{n=1}^N d_{z,n} x_{n,k}} \quad (k = \overline{1, K}; z = \overline{1, Z}), \quad (13)$$

где  $\Pi$  – максимальная скорость передачи используемой технологии беспроводной связи (Мбит/с).

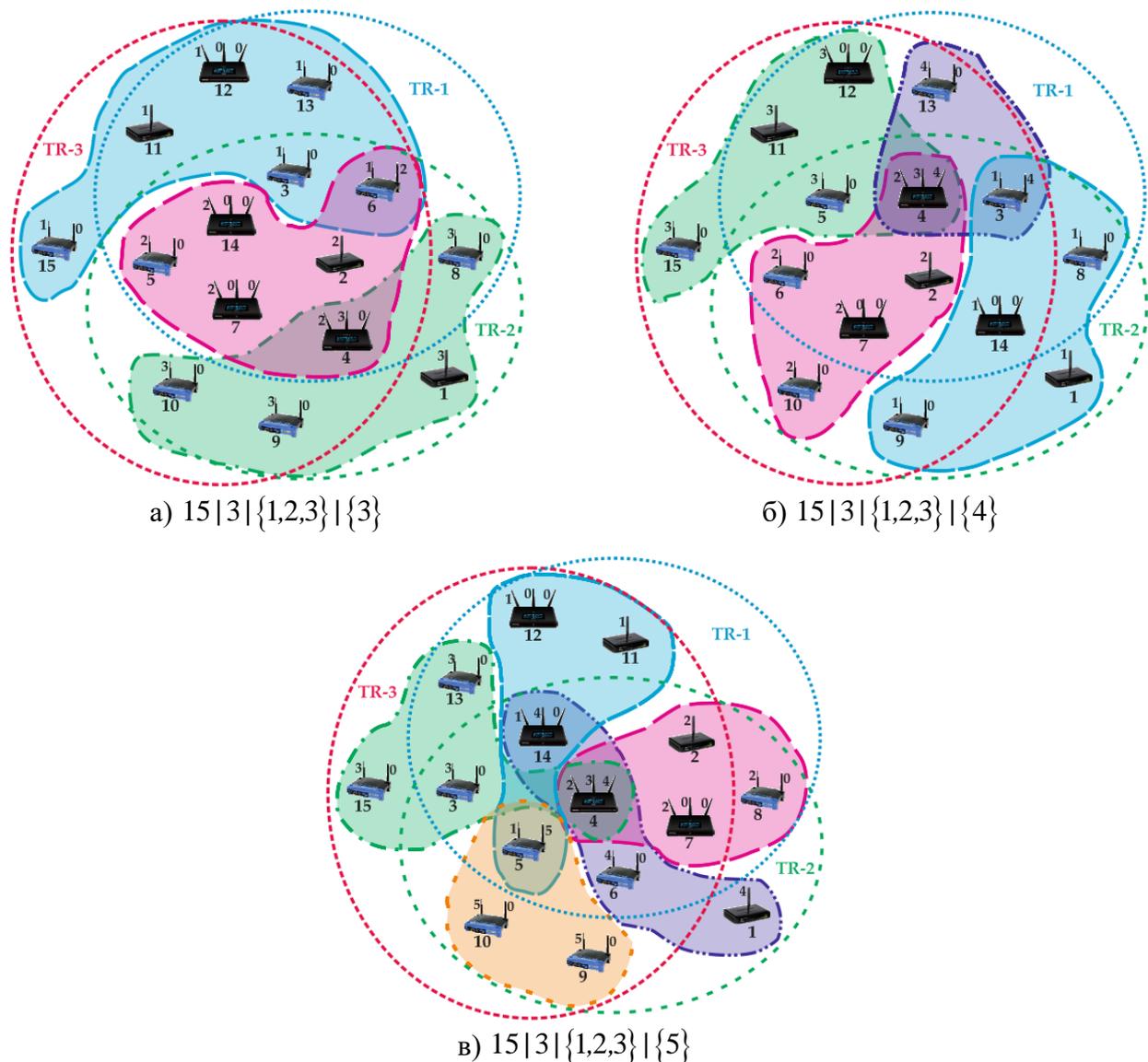


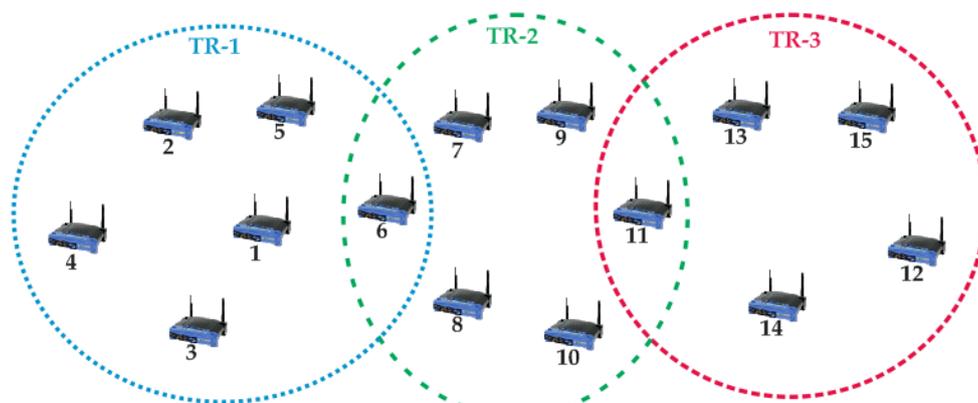
Рис. 4. Пример решения задачи распределения различного числа неперекрывающихся ЧК в mesh-сети

Для количественного представления результатов анализа в качестве примера было использовано направление связи между mesh-станциями №1 и №15 (рис. 4). Из результатов, представленных на рис. 4, установлено [20], что использование каждого дополнительного неперекрывающегося ЧК позволяет повысить производительность направления связи, а в результате и mesh-сети в целом, на 20-25%.

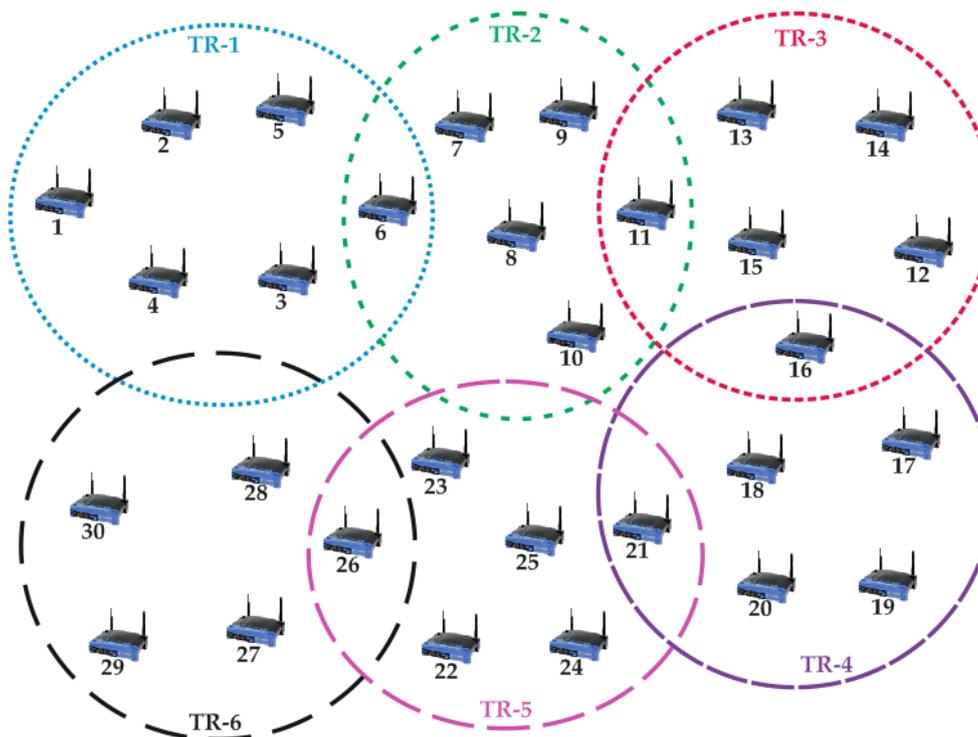
## 2.2. ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ПОЛУЧАЕМЫХ РЕШЕНИЙ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РАЗЛИЧНОГО ЧИСЛА СТАНЦИЙ MESH-СЕТИ

Для анализа качества получаемых решений задачи распределения ЧК рассмотрим их зависимость от числа используемых станций в беспроводной mesh-сети. Для этого были использованы два примера беспроводных mesh-сетей, отличающихся числом используемых станций. Особенностью данных примеров является то, что станции сети разбиты на зоны устойчивого приема с равным числом mesh-станций. Это позволило устранить зависимости получаемых решений от числа mesh-станций входящих в состав зоны устойчивого приема. В первом примере (рис. 5 а) mesh-сеть  $15|3|\{2\}|\{4\}$  состояла из пятнадцати станций, разбитых на три зоны устойчивого приема, две из которых имеют в своем составе по шесть станций, а одна – пять. В качестве второго примера (рис. 5 б) была использована mesh-сеть

$30|6|\{2\}|\{4\}$  состоящая из тридцати станций, формирующих шесть зон устойчивого приема, пять из которых имели в своем составе по шесть станций, а одна – пять. Результат решения задачи распределения ЧК между РИ mesh-станций приведены на рис. 6 а и рис. 6 б для сетей  $15|3|\{2\}|\{4\}$  и  $30|6|\{2\}|\{4\}$  соответственно.



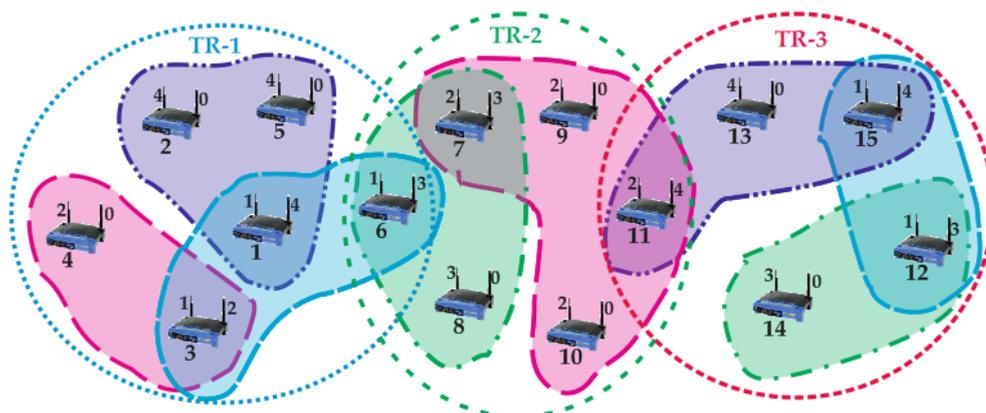
а)  $15|3|\{2\}|\{4\}$



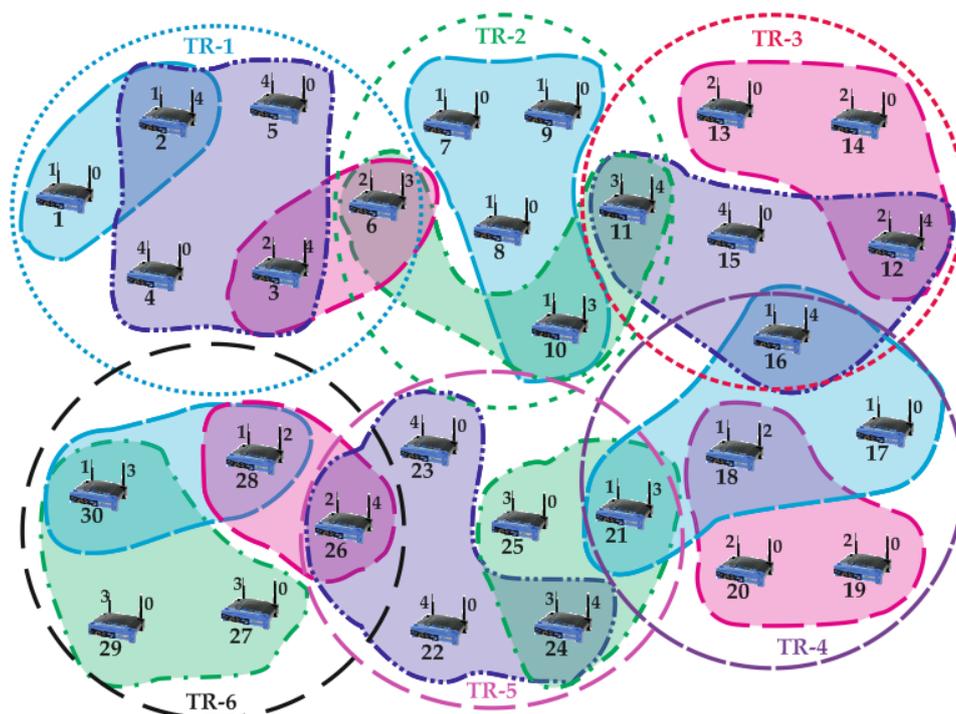
б)  $30|6|\{2\}|\{4\}$

Рис. 4. Примеры возможных конфигураций mesh-сетей с различным числом станций

В ходе решения установлено, что в обоих случаях mesh-сеть разбивалась на связанные домены коллизий, максимальный размер которых не превышает четырех станций. Из полученных результатов можно сделать вывод, что решение сформированной задачи распределения ЧК не зависит от размеров mesh-сети при условии формирования зон устойчивого приема с равным числом станций.



а)  $15|3|\{2\}|\{4\}$



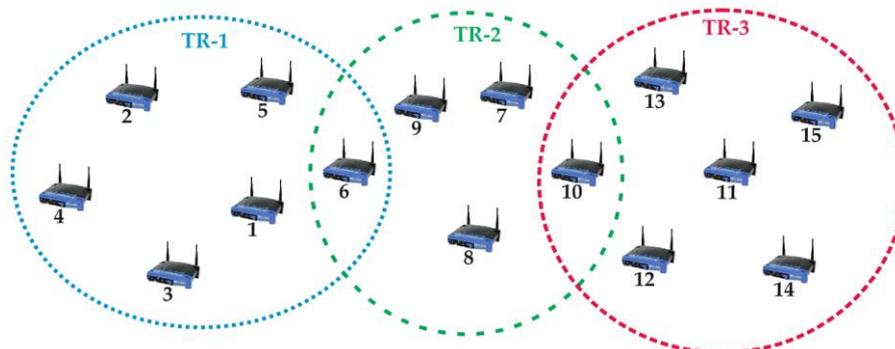
б)  $30|6|\{2\}|\{4\}$

Рис. 5. Пример решения задачи распределения четырех ЧК в mesh-сети с различным числом станций

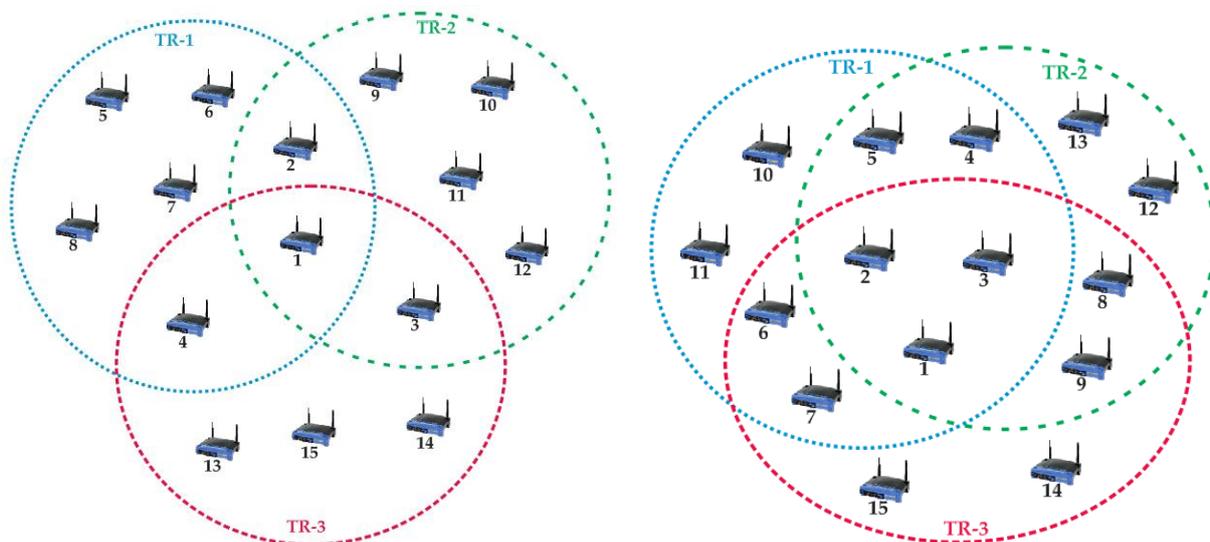
### 2.3. ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ПОЛУЧАЕМЫХ РЕШЕНИЙ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РАЗЛИЧНОЙ СТЕПЕНИ ПЕРЕКРЫТИЯ ЗОН УСТОЙЧИВОГО ПРИЕМА

С целью определения зависимости качества получаемых решений задачи распределения ЧК от степени перекрытия зон устойчивого приема используем примеры возможных конфигураций mesh-сетей, представленных на рис. 7. Для примера были использованы возможные конфигурации mesh-сети  $15|3|\{2\}|\{4\}$  различной степени перекрытия. Так на рис. 7 а приведен пример возможной конфигурации mesh-сети  $15|3|\{2\}|\{4\}$  с низкой степенью перекрытия зон устойчивого, в которой тринадцать из пятнадцати станций принадлежат одной из трех зон устойчивого приема, а две станции (№6 и №10) находятся на пересечении двух зон устойчивого приема. Возможная конфигурация mesh-сети  $15|3|\{2\}|\{4\}$  со средней степенью перекрытия зон устойчивого приема приведена на рис. 7 б, в которой одиннадцать станций принадлежат одной из трех зон устойчивого приема, три станции находятся на пересечении двух зон устойчивого приема, а одна станция находится на пересечении трех зон

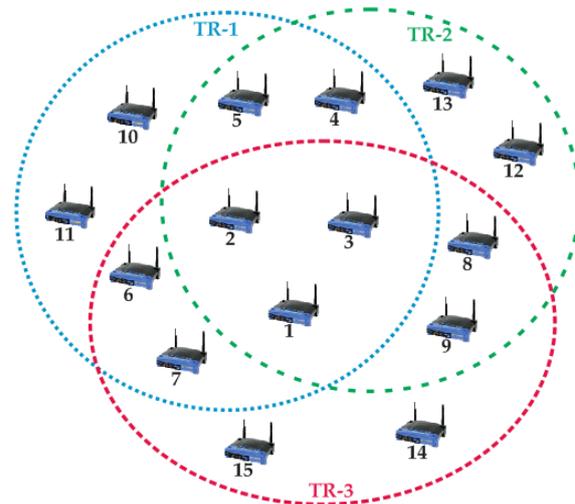
устойчивого приема. На рис. 7 в изображена возможная конфигурация mesh-сети  $15|3|\{2\}|\{4\}$  с высокой степенью перекрытия зон устойчивого приема, шесть станций которой находятся в одной из трех зон устойчивого приема, шесть станций находятся на пересечении двух зон устойчивого приема, а три на пересечении трех зон устойчивого приема.



а) низкая степень перекрытия зон устойчивого приема



б) средняя степень перекрытия зон устойчивого приема

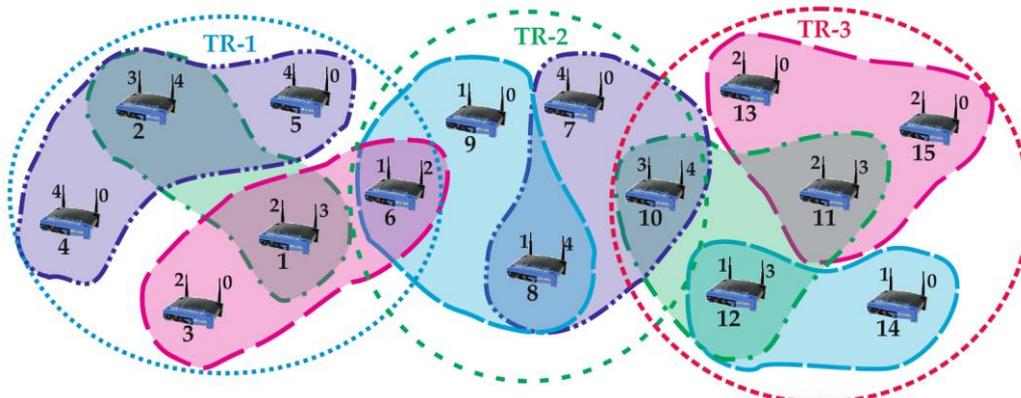


в) высокая степень перекрытия зон устойчивого приема

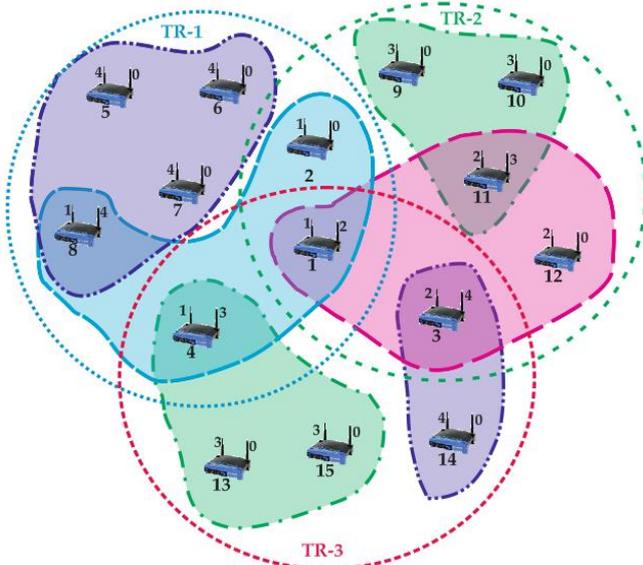
Рис. 7. Пример возможных конфигураций mesh-сетей  $15|3|\{2\}|\{4\}$  с различной степенью перекрытия зон устойчивого приема

Для решения задачи распределения ЧК между РИ станций mesh-сети было использовано четыре неперекрывающихся ЧК, примеры решения которой приведены на рис. 8.

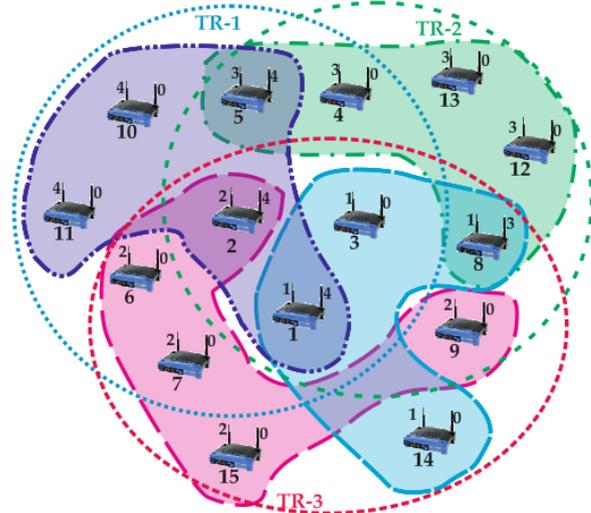
В случае использования возможной конфигурации mesh-сети  $15|3|\{2\}|\{4\}$  с низкой степенью перекрытия зон устойчивого приема (рис. 8 а) она распадается на восемь связанных доменов коллизий, максимальный размер которых не превышает трех станций. Также в случае низкой степени перекрытия каждая зона устойчивого приема разбивалась не более чем на  $K$  доменов коллизий. При этом число формируемых доменов коллизий снижалось на численность зон устойчивого приема связанных с ней. Увеличение степени перекрытия зон устойчивого приема (рис. 8 б) привело к снижению числа формируемых доменов коллизий и увеличению их максимального размера  $\alpha$  до четырех. В случае использования возможной конфигурации mesh-сети  $15|3|\{2\}|\{4\}$  с высокой степенью перекрытия зон устойчивого приема (рис. 8 в) число создаваемых доменов коллизий было равно числу используемых неперекрывающихся ЧК, а именно четырем. При этом максимальный размер доменов коллизий был увеличен до пяти станций  $\alpha = 5$ .



а) низкая степень перекрытия зон устойчивого приема



б) средняя степень перекрытия зон устойчивого приема



в) высокая степень перекрытия зон устойчивого приема

Рис. 8. Пример решения задачи распределения четырех ЧК в mesh-сетях  $15|3|\{2\}|\{4\}$  с различной степенью перекрытия зон устойчивого приема

На основе полученных результатов можно сделать вывод, что увеличение степени перекрытия зон устойчивого приема приводит к увеличению размеров создаваемых доменов коллизий, работающих на одном ЧК, и тем самым снижает производительности mesh-сети в целом. Уменьшения степени перекрытия зон устойчивого приема можно добиться путем управления излучаемой мощностью станций mesh-сети. Однако вопросы управления излучаемой мощностью mesh-станций не включены в сформированную математическую модель и поэтому выходят за рамки данной статьи.

#### 2.4. АНАЛИЗ ЗАВИСИМОСТИ КАЧЕСТВА ПОЛУЧАЕМЫХ РЕШЕНИЙ ОТ СТЕПЕНИ ОТЛИЧИЯ В РАЗМЕРАХ ЗОН УСТОЙЧИВОГО ПРИЕМА MESH-СЕТИ

Рассмотрим, каким образом степень отличия в размерах зон устойчивого приема беспроводной mesh-сети влияет на качество получаемых решений задачи распределения ЧК между РИ станций. Под размером зоны устойчивого приема будем понимать число mesh-станций входящих в ее состав. Для анализа были использованы возможные конфигурации mesh-сетей  $15|3|\{2\}|\{4\}$  с одинаковыми и различными размерами зон устойчивого приема, которые приведены на рис. 7 а и рис. 9 соответственно.

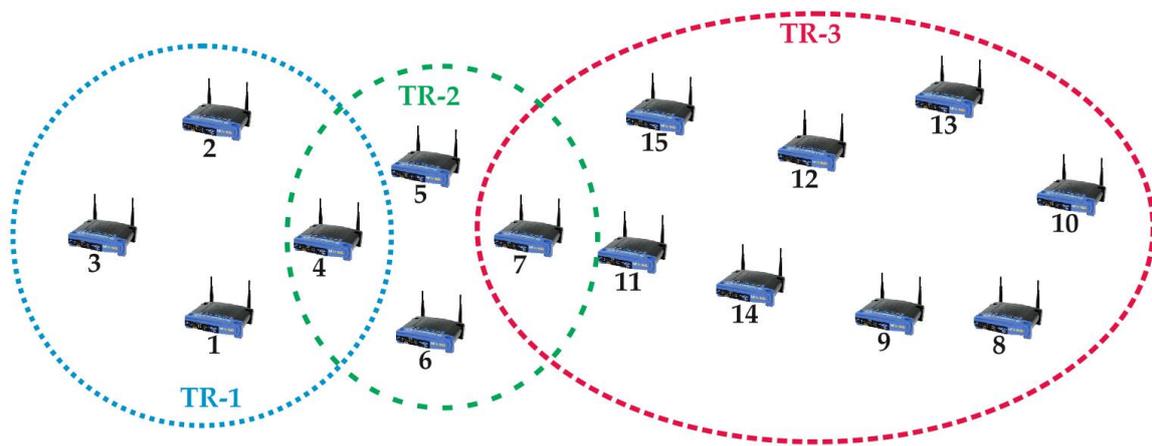


Рис. 9. Пример возможной конфигурации mesh-сети  $15|3|\{2\}|\{4\}$  с различными размерами зон устойчивого приема

Результат решения задачи распределения ЧК для возможной конфигурации mesh-сети  $15|3|\{2\}|\{4\}$  с одинаковыми размерами зон устойчивого приема приведены на рис. 8 а, а на рис. 10 – с различными размерами зон устойчивого приема. Из полученных результатов установлено, что использование mesh-сети с одинаковыми размерами зон устойчивого приема позволяет произвести разбиение mesh-сети на восемь сбалансированных доменов коллизий, максимальный размер которых не превышает трех станций ( $\alpha = 3$ ). Решение, получаемое для mesh-сети с зонами устойчивого приема различных размеров, также состоит из восьми доменов коллизий, равномерно распределенных по трем зонам устойчивого приема. Однако на рис. 10 показано, что максимальный размер создаваемых доменов коллизий несколько больше значения, получаемого для mesh-сети с одинаковыми размерами зон устойчивого приема, и составляет  $\alpha = 4$ . Увеличение значения  $\alpha$  по сравнению с примером использования однородной топологии mesh-сети вызвано использованием зоны устойчивого приема большого размера (TR-3).

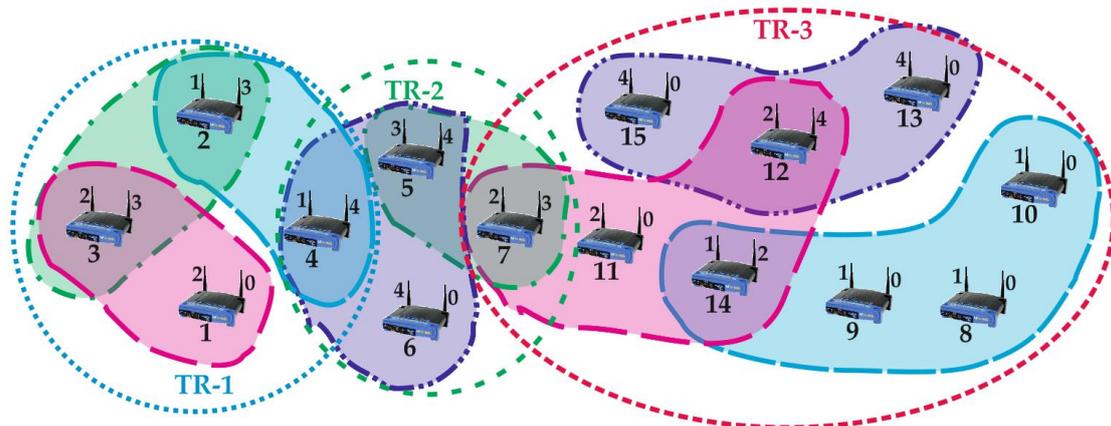


Рис. 10. Пример решения задачи распределения четырех ЧК для mesh-сети  $15|3|\{2\}|\{4\}$  с неоднородными зонами устойчивого приема

На основе результатов, представленных на рис. 8 а и рис. 10, можно сделать вывод, что качество получаемых решений задачи распределения ЧК зависит от степени различия размеров зон устойчивого приема входящих в состав mesh-сети. Решение, получаемое при использовании mesh-сети с зонами устойчивого приема различных размеров, может оказаться несбалансированным относительно размеров создаваемых доменов коллизий, что соответственно может привести к снижению общей производительности беспроводной mesh-сети.

## 2.5. ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ПОЛУЧАЕМЫХ РЕШЕНИЙ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РАЗЛИЧНОГО ЧИСЛА РАДИОИНТЕРФЕЙСОВ НА СТАНЦИЯХ MESH-СЕТИ

Рассмотрим, каким образом число поддерживаемых РИ на станциях mesh-сети влияет на качество получаемых решений задачи распределения ЧК. Для этого были использованы примеры возможных конфигураций mesh-сетей с числом станций, превышающим число используемых неперекрывающихся ЧК:  $8|1|\{2\}|\{5\}$  (рис. 11 а),  $8|1|\{3\}|\{5\}$  (рис. 11 б) и  $8|1|\{1,2,3\}|\{5\}$  (рис. 11 в).

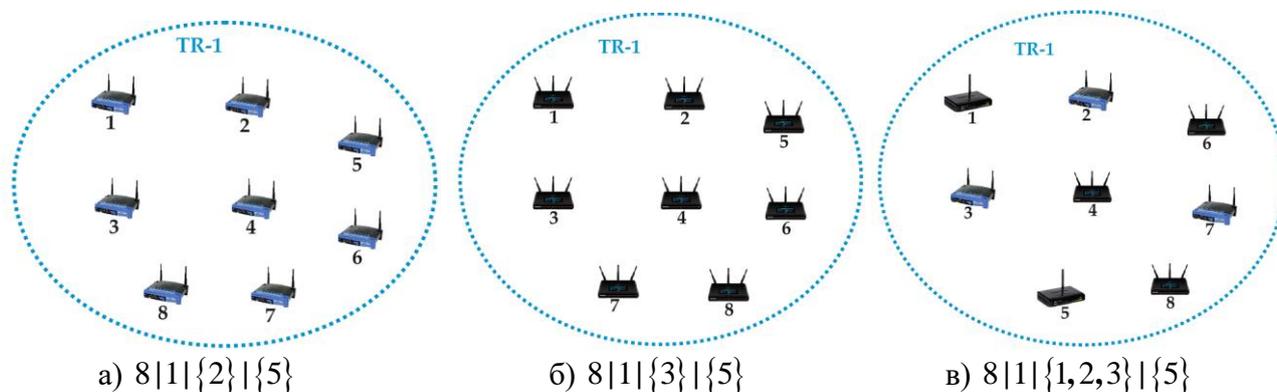


Рис. 11. Примеры возможных конфигураций mesh-сетей с числом станций, превышающим число используемых неперекрывающихся ЧК

Результаты решения задачи распределения ЧК между РИ станций mesh-сети для указанных примеров возможных конфигураций (рис. 11) приведены на рис. 12.

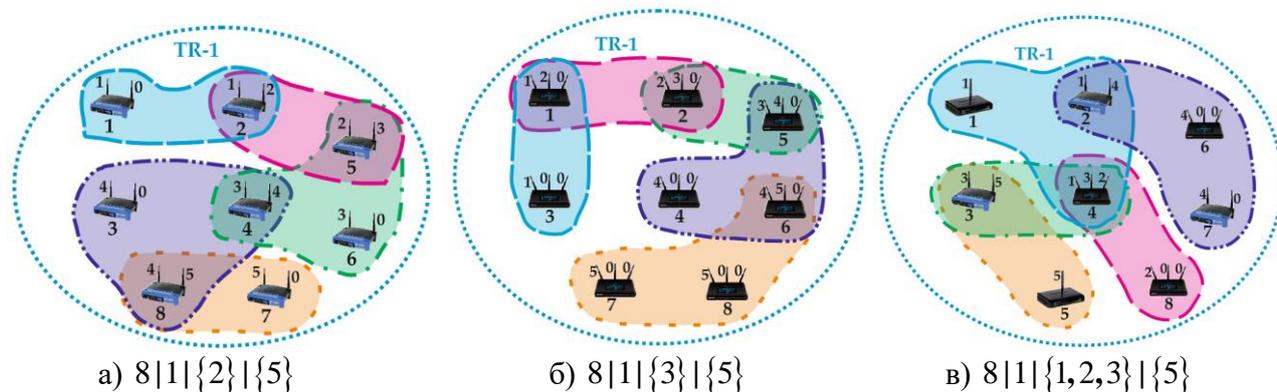


Рис. 12. Пример решения задачи распределения четырех ЧК в mesh-сетях с различным числом РИ на станциях и числом неперекрывающихся ЧК, не превышающим число станций

На основе полученных результатов установлено, что во всех рассмотренных случаях mesh-сети разбивались на пять доменов коллизий. При этом размеры создаваемых доменов коллизий не превышали трех станций ( $\alpha = 3$ ). Поэтому качество решения задачи распределения ЧК в случае, когда число станций превышает общее число используемых неперекрывающихся ЧК, не зависит от числа используемых РИ на станциях mesh-сети.

Также были рассмотрены примеры, когда число используемых неперекрывающихся ЧК ниже числа станций, формирующих зону устойчивого приема. Для анализа были использованы примеры возможных конфигураций mesh-сетей (рис. 13):  $4|1|\{2\}|\{5\}$ ,  $4|1|\{3\}|\{5\}$  и  $4|1|\{1,2,3\}|\{5\}$ .

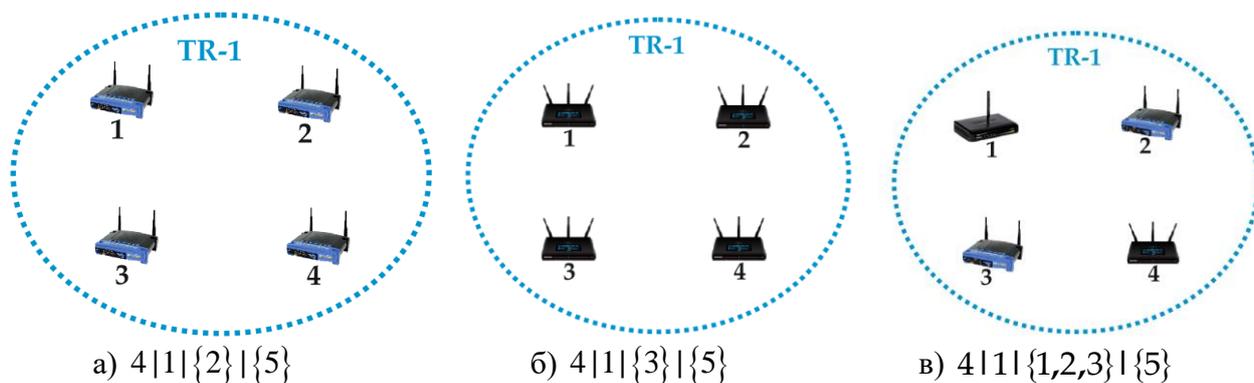


Рис. 13. Примеры возможных конфигураций mesh-сетей с различным числом РИ на станциях и числом неперекрывающихся ЧК, превышающим число станций

Результаты решения задачи распределения ЧК между РИ станций mesh-сети с числом станций, не превышающим число используемых неперекрывающихся ЧК, приведены на рис. 14.

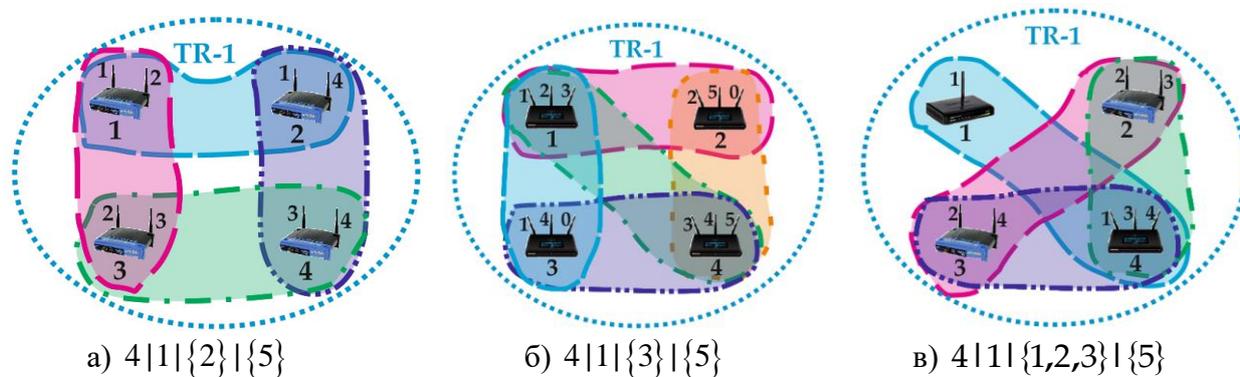


Рис. 14. Пример решения задачи распределения четырех ЧК в mesh-сетях с различным числом РИ на станциях и числом неперекрывающихся ЧКЖ, превышающим число станций

В результате анализа полученных решений установлено, что в mesh-сетях  $4|1|\{2\}|\{5\}$  (рис. 14 а) и  $4|1|\{1,2,3\}|\{5\}$  (рис. 14 в) возможно использовать только четыре неперекрывающихся ЧК из пяти доступных. Такой результат обеспечивается выполнением условия-ограничения (7), так как общее число РИ, включенных на станциях mesh-сети, не позволяет использовать больше четырех неперекрывающихся ЧК. В свою очередь, использование на всех mesh-станциях сети трех РИ (рис. 14 б) позволяет сформировать структуру mesh-сети с использованием пяти неперекрывающихся ЧК. При этом во всех полученных результатах размеры создаваемых доменов коллизий не превышали двух mesh-станций ( $\alpha = 2$ ).

На основе проведенного анализа зависимости качества получаемых решений от числа используемых РИ на станциях mesh-сети можно сделать следующий вывод. В mesh-сетях с числом неперекрывающихся ЧК, не превышающим общее число станций, результат решения задачи распределения ЧК никаким образом не зависит от числа используемых РИ. В случае, когда число неперекрывающихся ЧК превышает общее число станций mesh-сети, увеличение числа используемых РИ приводит к увеличению числа формируемых доменов коллизий. При этом размеры создаваемых доменов коллизий являются минимальными и состоят из двух mesh-станций. В таких сетях увеличение используемых РИ не приводит к повышению производительности в рамках создаваемых доменов коллизий, однако позволяет получить более качественную структуру беспроводной mesh-сети для решения задач функциональной самоорганизации.

## ВЫВОДЫ

В статье приведены результаты оценки качества решений по распределению ЧК в MR-MS WMN стандарта IEEE 802.11, получаемые с использованием двухиндексной математической модели, разработанной в [20]. Оценка качества решений по распределению ЧК производилась на основе анализа их зависимости от следующих исходных данных: характеристик mesh-сети (общее число станций в mesh-сети, число РИ на станциях mesh-сети), используемых технологий беспроводной связи (число используемых неперекрывающихся ЧК) и территориального разнесения станций mesh-сети (степень перекрытия зон устойчивого приема, неоднородность зон устойчивого приема mesh-сети, размер зоны устойчивого приема).

В результате проведенного анализа было установлено, что на качество получаемых решений в значительной степени влияют такие особенности mesh-сети, как используемая технология беспроводной связи и территориальное разнесение станций, поэтому более детально остановимся именно на этих показателях. Так на рис. 15 приведена зависимость верхнего динамически управляемого порога  $\alpha$  от числа используемых частотных каналов и числа mesh-станций, формирующих одну зону устойчивого приема.

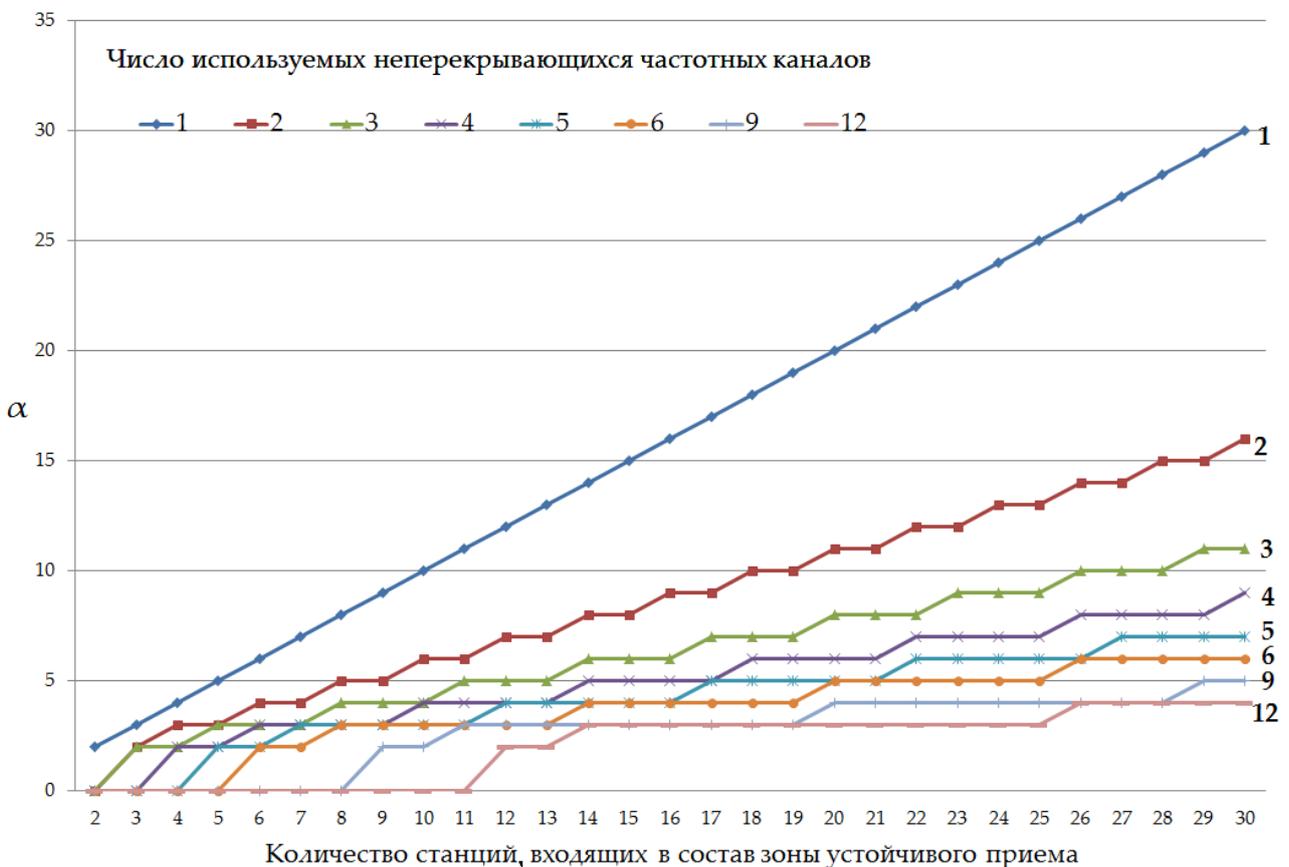


Рис. 15. Зависимость верхнего динамически управляемого порога  $\alpha$  от числа используемых частотных каналов и размера зоны устойчивого приема

В результате анализа зависимости качества распределения ЧК от числа используемых ЧК установлено, что увеличение числа используемых неперекрывающихся ЧК позволяет уменьшить размер создаваемых доменов коллизий (рис. 15) и тем самым повысить общую производительность mesh-сети. Проведенные исследования показали, что использование каждого дополнительного неперекрывающегося ЧК позволяет повысить производительность mesh-сети на 20-25%.

Также был проведен анализ зависимости качества распределения ЧК от размера зоны устойчивого приема (числа станций, входящих в состав одной зоны устойчивого приема). В ходе анализа установлено, что уменьшение размера зоны устойчивого приема приводит к

снижению размеров создаваемых доменов коллизий (рис. 15), что в свою очередь способствует повышению общей производительности mesh-сети. Также уменьшение размера зоны устойчивого приема может быть направлено на уменьшение количества используемых неперекрывающихся ЧК, без потери качества получаемых решений. Уменьшение количества используемых неперекрывающихся ЧК в свою очередь способствует улучшению электромагнитной обстановки в зоне действия беспроводной mesh-сети.

Кроме того была проанализирована зависимость качества получаемых решений задачи распределения ЧК от степени перекрытия зон устойчивого приема (числа mesh-станций находящихся одновременно в нескольких TR), а также степени различия размеров зон устойчивого приема. В результате анализа установлено, что уменьшение степени перекрытия зон устойчивого приема позволяет повысить качество получаемых решений, т.е. уменьшить размер создаваемых доменов коллизий, тем самым повышая общую производительность mesh-сети. Также повышения производительности mesh-сети можно добиться путем устранения различия в размерах используемых зон устойчивого приема, т. е. выполняя балансировку размеров зон устойчивого приема, формирующих mesh-сеть.

В этой связи, дальнейшие исследования по формированию высокопроизводительной структуры mesh-сети, с использованием двухиндексной математической модели, целесообразно направить на достижение следующих результатов:

- минимизировать размер зон устойчивого приема;
- устранить неоднородность зон устойчивого приема;
- минимизировать степень перекрытия зон устойчивого приема.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Akyildiz I.F., Wang X., Wang W.* Wireless mesh networks: a survey // *Computer Networks*. – 2005. – Vol. 47, No.2. – P.445–487.
2. *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>.
3. *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.
4. *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.
5. *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.
6. *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.
7. *Marcel Rocha Da Silva M., Ferreira De Rezende J.* 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.
8. *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.
9. *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](http://pt.journal.kh.ua/2010/1/1/101_lemeshko_mesh.pdf).
10. *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.
11. *Gogolieva, M., Garkusha S., Abed, A.H.* A mathematical model of channel distribution in multichannel mesh networks 802.11 // *11th International Conference The Experience of Designing and Application, CAD Systems in Microelectronics (CADSM)*. – 2011. – P.71–73.
12. *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.

13. *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.
14. *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.
15. *Ko B., Misra V., Padhye J., Rubenstein D.* Distributed channel assignment in multi-radio 802.11 mesh networks // WCNC. – 2007. – P. 58–72.
16. *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.
17. *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.
18. *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.
19. *Лемешко А.В., Гаркуша С.В.* Классификация методов распределения частотных каналов в многоинтерфейсных многоканальных mesh-сетях стандарта IEEE 802.11 [Электронный ресурс] // Проблемы телекоммуникаций. – 2011. – № 2 (4). – С. 139–149. – Режим доступа к журн.: [http://pt.journal.kh.ua/2011/2/1/112\\_lemeshko\\_classification.pdf](http://pt.journal.kh.ua/2011/2/1/112_lemeshko_classification.pdf).
20. *Гаркуша С.В.* Разработка и анализ двухиндексной модели распределения частотных каналов в многоканальной mesh-сети стандарта IEEE 802.11 [Электронный ресурс] // Проблемы телекоммуникаций. – 2011. – № 3 (5). – С. 39–57. – Режим доступа к журн.: [http://pt.journal.kh.ua/2011/3/1/113\\_garkusha\\_mesh.pdf](http://pt.journal.kh.ua/2011/3/1/113_garkusha_mesh.pdf).