

УДК 621.391

РАЗРАБОТКА И АНАЛИЗ ДВУХИНДЕКСНОЙ МОДЕЛИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТОТНЫХ КАНАЛОВ В МНОГОКАНАЛЬНОЙ MESH-СЕТИ СТАНДАРТА IEEE 802.11



[С.В. ГАРКУША](#)

Харьковский национальный
университет радиоэлектроники

В статті представлено двоіндексну модель розподілу частотних каналів в багатоканальних mesh-мережах стандарту IEEE 802.11. Проведено аналіз отриманих рішень при використанні різних критеріїв оптимальності.

The article introduces a double index model of the distribution frequency channels in the multi-channel mesh-networking standard IEEE 802.11. The analysis of the solutions obtained using different optimality criteria.

В статье представлена двухиндексная модель распределения частотных каналов в многоканальных mesh-сетях стандарта IEEE 802.11. Проведен анализ получаемых решений при использовании различных критериев оптимальности.

Введение

Появление экономически эффективных беспроводных mesh-сетей (Wireless Mesh Networks, WMNs), основанных на технологии IEEE 802.11, существенным образом изменило процесс организации как беспроводных сетей доступа, так и транспортных радиосетей. На сегодняшний день уже есть убедительные доказательства того, что модель доступа пользователей с использованием инфраструктуры стандарта IEEE 802.11 хорошо подходит для сетей, используемых в домашних условиях и в пределах небольших предприятий. Данные сети охватывают ограниченную территорию с небольшим числом пользователей. В свою очередь транспортная модель mesh-сети подходит для сетей с высокой плотностью точек доступа (Access Point, AP), которые предназначены для связи пользователей на большой территории. Транспортная сетевая архитектура mesh-сетей обладает рядом достоинств, к которым необходимо отнести: надежность, масштабируемость, рентабельность и простоту в построении [1].

Среди многих требований, выдвигаемых к беспроводным mesh-сетям, например, невысокие стоимость устройств и уровень энергопотребления, основным является обеспечение высокой производительности с дифференцированным (или даже гарантированным) качеством обслуживания запросов пользователей. Исследования, направленные на повышение производительности mesh-сети в целом, затрагивают протокольные средства от физического до сетевого уровней модели взаимодействия

открытых систем OSI. Особого внимания заслуживает подход, реализуемый на канальном и сетевом уровнях и основанный на использовании нескольких радиointерфейсов (РИ) и неперекрывающихся частотных каналов (ЧК). Использование в mesh-сетях одноканального (single-channel) или одноинтерфейсного (single-radio) режима работы в большинстве случаев приводит к ограничению производительности транспортной mesh-сети [3, 4]. Дополнения к стандарту IEEE 802.11s [5] позволяют использовать mesh-станции как с одним, так и с несколькими РИ. При этом каждый из РИ может быть настроен на отдельный ЧК, организуя, таким образом, работу многоинтерфейсной многоканальной mesh-сети (Multi-radio Multi-channel Wireless Mesh Networks, MR-MC WMN).

Использование сетей типа MR-MC WMN по независимым оценкам специалистов [1, 6, 7] позволяет сократить число абонентов, работающих на одном и том же ЧК, снизив, тем самым, уровень интерференции и обеспечив, в конечном итоге, повышение производительности mesh-сети в целом. В настоящее время получен ряд интересных результатов [1, 6-22], направленных на решение задачи распределения ЧК в MR-MC WMN, с целью повышения производительности беспроводных mesh-сетей. Однако многие из известных результатов, как показано в работе [23], не лишены недостатков, обусловленных несовершенством используемых математических моделей и методов решения задачи распределения ЧК. В этой связи актуальной представляется задача, связанная с выбором или разработкой моделей и методов распределения ЧК между РИ станций в многоинтерфейсных многоканальных mesh-сетях стандарта IEEE 802.11.

I. Анализ требований, выдвигаемых к моделям и методам распределения частотных каналов в MR-MC WMN

На сегодняшний день существует достаточно широкий спектр подходов, позволяющих произвести распределение ЧК в многоканальных mesh-сетях стандарта IEEE 802.11. Доказательством тому служит классификация существующих методов распределения ЧК в беспроводных mesh-сетях стандарта IEEE 802.11, приведенная в работе [23]. Необходимо констатировать, что адекватность и эффективность решения задачи распределения ЧК с использованием того или иного метода очень часто определяется математической моделью, положенной в его основу. В работах [13, 23] были сформулированы требования к структуре и содержанию математической модели распределения ЧК в многоканальных mesh-сетях:

- обеспечение динамического характера решений задачи распределения ЧК;
- учет типа и характера циркулирующего в mesh-сети трафика;
- учет неоднородности современных mesh-сетей ввиду использования оборудования различных модификаций, серий и фирм-производителей;
- ориентация решений на максимизацию производительности mesh-сети в целом;

– обеспечение согласованности решений по распределению ЧК для всех станций mesh-сети.

Важно понимать, что эффективность технологического решения задачи распределения ЧК каналов в многоканальных mesh-сетях во многом определяется полнотой учета требований при построении и функционировании mesh-сети, описываемой математической моделью. Результатом неполного их учета в математическом описании в большинстве случаев является усложнение реализуемого протокола. В конечном итоге, исходя из вышеприведенных требований, используемая модель должна обеспечивать [13, 23]:

– одновременное и согласованное решение задач кластеризации, выделения РИ на mesh-станциях и закрепление за ними неперекрывающихся ЧК;

- учет технологических особенностей сети, таких как дальность связи, интенсивность поступления в сеть абонентского трафика, количество используемых неперекрывающихся ЧК, количество поддерживаемых РИ на станциях mesh-сети и т.п.;

- обеспечение отсутствия эффекта «скрытой станции»;

- учет территориальной удаленности mesh-станций, их активности, мощности, и т.д.

В работе [13] была представлена модель распределения ЧК в MR-МС WMN, в которой произведен наиболее полный учет вышеприведенных требований. Недостатком указанной модели является ее трехиндексный характер, который определяет сравнительно высокую размерность задачи, что снижает масштабируемость конечных решений. Поэтому актуальной представляется задача, связанная с модификацией ранее известной модели [13] с целью снижения ее размерности и ожидаемым повышением масштабируемости технологических решений по распределению ЧК в многоканальной mesh-сети.

II. Двухиндексная модель распределения частотных каналов в многоканальной mesh-сети

В рамках данной работы, как и ранее в работах [7, 13-15, 23], будет использовано понятие зоны устойчивого приема (Transmission Range, TR), образующейся множеством mesh-станций максимальной мощности, которые могут обмениваться информацией (пакетами) с использованием выбранной в mesh-сети технологии беспроводной связи. С целью разработки математической модели распределения ЧК в MR-МС WMN введем ряд условных обозначений (табл. 1), по аналогии с условными обозначениями, используемыми в работе [13], позволяющими графически отобразить элементы mesh-сети.

При разработке модели будут использованы следующие исходные данные:

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





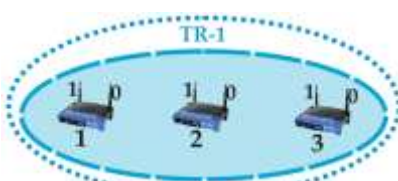
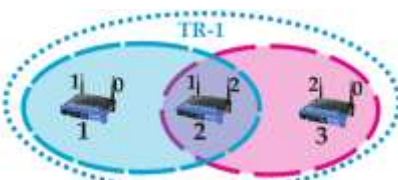
2) K – общее количество неперекрывающихся ЧК, используемых в mesh-сети (в технологии IEEE 802.11b/g доступно $3 \div 4$ неперекрывающихся ЧК, а в технологии IEEE 802.11a – 12 неперекрывающихся ЧК);

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 включенных РИ на n -й mesh-станции. Как правило, данный параметр равен единице;

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

Таблица 1. Пример условных обозначений элементов mesh-сети

Условное обозначение	Описание
	Mesh-станция №2 использует один РИ, которому выделен третий ЧК.
	Mesh-станция №3 использует два РИ: первому РИ выделен второй ЧК, а второй РИ не используется.
	Mesh-станция №1 использует три РИ: первый РИ работает на втором ЧК, второй – на первом ЧК, а третий – на третьем ЧК.
	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 обмен данными непосредственно друг с другом.
	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.
	Mesh-станции №1, №2 и №3 находятся в одной зоне устойчивого приема (TR-1). 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.

В математической модели использовано понятие матрицы зон устойчивого приема или TR-матрицы [13], позволяющей производить учет территориальной удаленности mesh-станций в сети. 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

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

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. 1 приведен пример mesh-сети с указанием числа зон устойчивого приема ($Z = 3$).

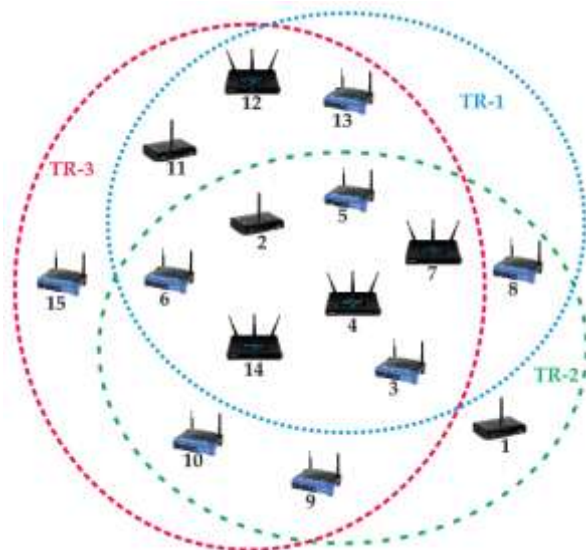


Рис. 1. Пример mesh-сети с указанием зон устойчивого приема при $Z = 3$ и $N = 15$

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

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

В рамках данной работы с целью указания топологических и функциональных параметров возможной конфигурации mesh-сети будет 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 – общее количество неперекрывающихся ЧК в MR MC WMN.

Множество M может состоять из единственного элемента, например $\{2\}$, в случае, если число РИ на каждой отдельно взятой станции mesh-сети одинаково (однородная mesh-сеть) и равно двум. Множество M также может быть представлено несколькими элементами, например $\{1,2,3\}$, если число РИ на станциях mesh-сети различно (неоднородная mesh-сеть), 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. 1, примет вид $15|3|\{1,2,3\}|\{3\}$.

В рамках предлагаемой модели, по аналогии с моделью, предложенной в [13], в ходе решения задачи распределения ЧК между mesh-станциями сети необходимо обеспечить расчет булевой управляющей переменной:

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

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

Новизна данного подхода заключается в том, что по сравнению с ранее известным решением [13] снижено общее количество управляющих переменных (1), определяющих порядок распределения ЧК. Указанной новизны удалось добиться путем формирования управляющей переменной (1), учитывающей только два индекса: количество станций в сети и число используемых неперекрывающихся ЧК. В работе [13], кроме указанных ранее индексов, также учитывается третий индекс – количество РИ, используемых на станциях mesh-сети.

В результате этого предложенная двухиндексная математическая модель имеет более низкую размерность (число управляющих переменных) по сравнению с математической моделью, предложенной в работе [13]. В работе [13] число управляющих переменных равно $K \sum_{n=1}^N m_n$, а для двухиндексной модели, предложенной в данной работе $N \cdot K$. В результате этого преимущество в размерности двухиндексной модели всегда будет в $\delta = \frac{\sum_{n=1}^N m_n}{N}$ раз ниже трехиндексной математической модели, предложенной в [13] (рис. 2).

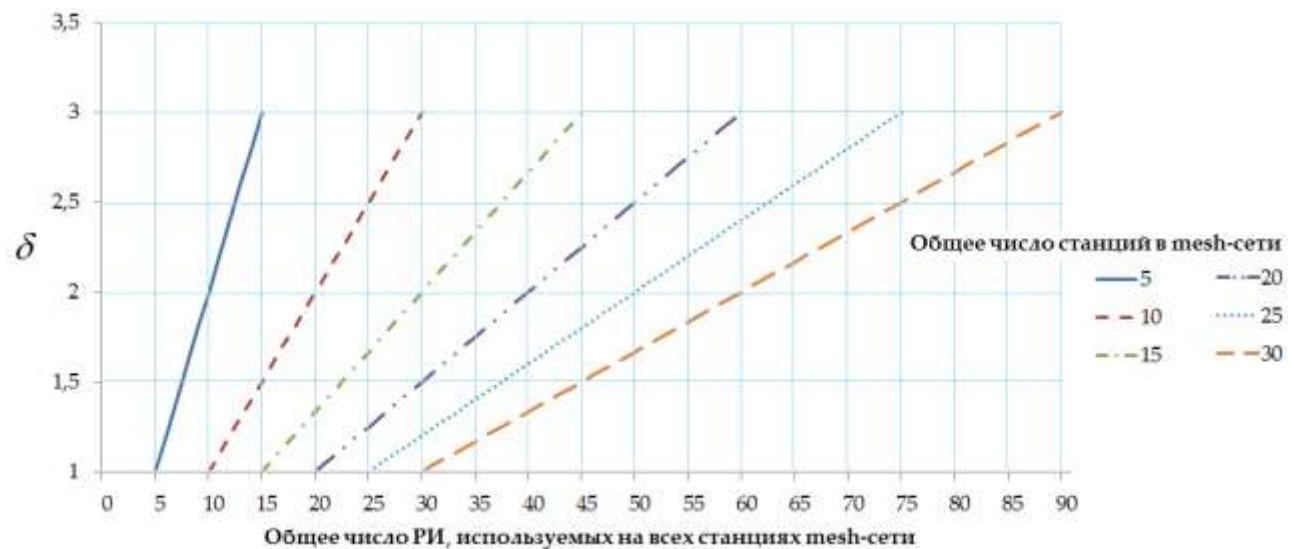


Рис. 2. Выигрыш двухиндексной модели в размерности задачи распределения ЧК в MR MC WMN

Как видно из графика, приведенного на рис. 2, использование двухиндексной математической модели позволяет снизить размерность задачи распределения ЧК от одного до трех раз по сравнению с трехиндексной математической моделью, предложенной в [13]. Необходимо отметить, что параметр δ прямо пропорционально зависит от среднего числа РИ, используемых на всех станциях mesh-сети, и возрастает при увеличении общего числа РИ при фиксированном количестве станций mesh-сети.

Результатом расчета управляющих переменных (1) 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 искомым переменных $x_{n,k}$ в каждой отдельно взятой зоне устойчивого приема G_z необходимо выполнить ряд важных условий ограничений:



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, закрепленных за радиоинтерфейсами одной mesh-станции.

Пример проверки выполнения условия (2) дан в табл. 2.

Таблица 2. Пример проверки выполнения условия включения mesh-станции в сеть



Условие (2) не выполняется	Условие (2) выполняется
$x_{1,1} = 0$	$x_{1,1} = 1$
	

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

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

Пример проверки выполнения условия (3) дан в табл. 3.

Таблица 3. Пример проверки выполнения условия выделения mesh-станции количества ЧК, не превышающего количества ее РИ

Условие (3) не выполняется	Условие (3) выполняется
$\sum_{k=1}^3 x_{1,k} = 3 \quad (x_{1,1} = 1; x_{1,2} = 1; x_{1,3} = 1)$	$\sum_{k=1}^3 x_{1,k} = 2 \quad (x_{1,1} = 1; x_{1,2} = 1; x_{1,3} = 0)$
	

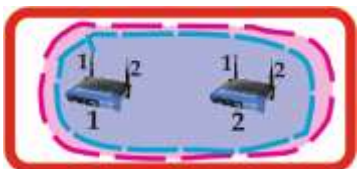
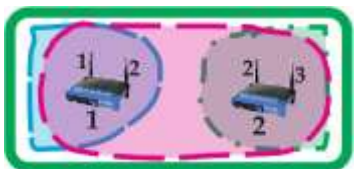
3. Условие работы двух mesh-станций друг с другом (в рамках одной зоны устойчивого приема) не более чем на одном ЧК:

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

которое вводится для устранения нежелательной структурной избыточности.

Пример проверки выполнения условия (4) дан в табл. 4.

Таблица 4. Пример проверки выполнения условия работы двух mesh-станций не более чем на одном ЧК

Условие (4) не выполняется	Условие (4) выполняется
$\sum_{k=1}^3 (x_{1,k} x_{2,k}) = 2$ $(x_{1,1} x_{2,1} = 1; x_{1,2} x_{2,2} = 1; x_{1,3} x_{2,3} = 0)$	$\sum_{k=1}^3 (x_{1,k} x_{2,k}) = 1$ $(x_{1,1} x_{2,1} = 0; x_{1,2} x_{2,2} = 1; x_{1,3} x_{2,3} = 0)$
	

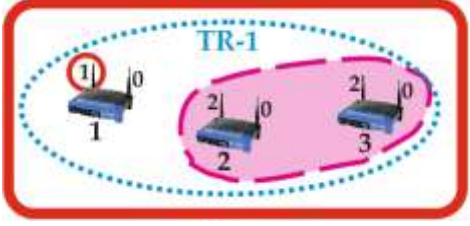
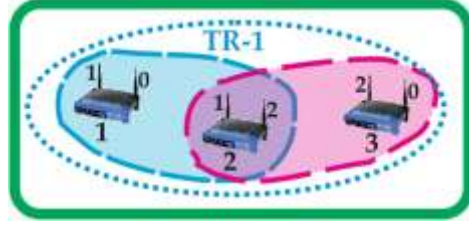
4. Условие того, что произвольная mesh-станция на используемом ею ЧК работает хотя бы с одной mesh-станцией своей TR:

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

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

Пример проверки выполнения условия (5) дан в табл. 5.

Таблица 5. Пример проверки выполнения условия работы произвольной mesh-станции на используемом ею ЧК хотя бы с одной mesh-станцией своей TR

Условие (5) не выполняется	Условие (5) выполняется
$x_{1,1} > x_{2,1} + x_{3,1}$ $(x_{1,1} = 1; x_{2,1} + x_{3,1} = 0)$	$x_{1,1} = x_{2,1} + x_{3,1}$ $(x_{1,1} = 1; x_{2,1} + x_{3,1} = 1)$
	

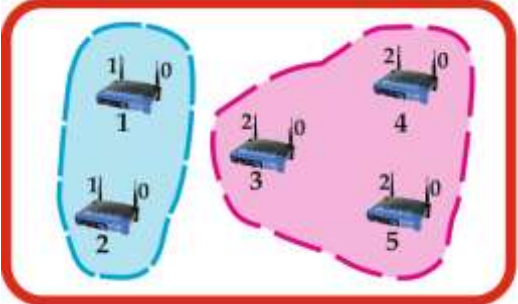
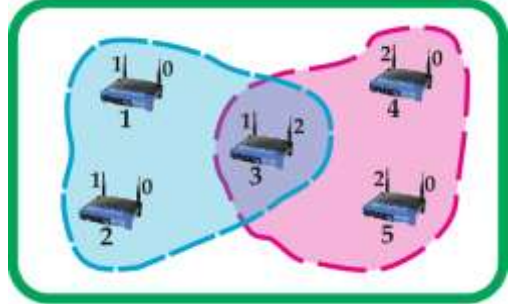
5. Условие связности mesh-сети (доменов коллизий) в каждой зоне устойчивого приема:

$$\sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N x_{n,k} \geq |G_z| + K - 1 - b \quad (z = \overline{1, Z}; n \in G_z), \quad (6)$$

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

Выражение $INT\left(\left[\sum_{n=1}^N m_n\right]/2\right)$ в условии-ограничении (6) определяет максимальное число неперекрывающихся ЧК, которые могут быть включены на РИ станций mesh-сети. Пример проверки выполнения условия (6) дан в табл. 6.

Таблица 6. Пример проверки выполнения условия связности mesh-сети (доменов коллизий)

Условие (6) не выполняется	Условие (6) выполняется
$\sum_{k=1}^2 \sum_{n=1}^5 x_{n,k} < 6$ $(x_{1,1} + x_{2,1} + x_{3,1} + x_{4,1} + x_{5,1} = 2;$ $x_{1,2} + x_{2,2} + x_{3,2} + x_{4,2} + x_{5,2} = 3)$	$\sum_{k=1}^2 \sum_{n=1}^5 x_{n,k} = 6$ $(x_{1,1} + x_{2,1} + x_{3,1} + x_{4,1} + x_{5,1} = 3;$ $x_{1,2} + x_{2,2} + x_{3,2} + x_{4,2} + x_{5,2} = 3)$
	

Выполнение условия (6) гарантирует, что количество используемых ЧК в z -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:

$$d_{z,n}d_{q,n}x_{n,k} \sum_{\substack{s \in G_z \\ s \notin G_q}} x_{s,k} \sum_{\substack{r \in G_q \\ r \notin G_z}} x_{r,k} = 0, \quad (7)$$

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

Пример проверки выполнения условия (7) дан в табл. 7.

Таблица 7. Пример проверки выполнения условия отсутствия эффекта «скрытой станции»

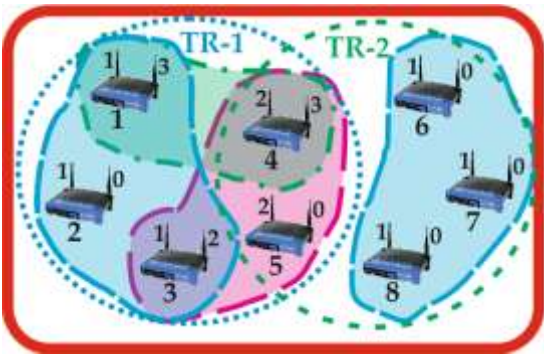
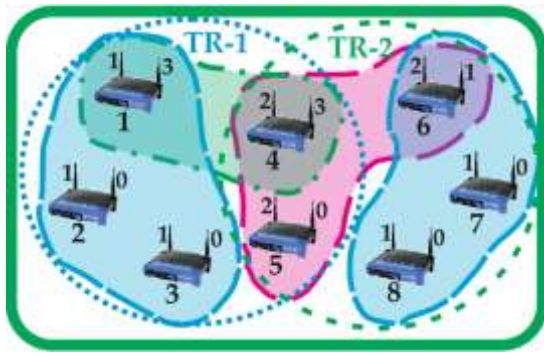
Условие (7) не выполняется	Условие (7) выполняется
$d_{1,3}d_{2,3}x_{3,1}(x_{1,1} + x_{2,1})(x_{4,1} + x_{5,1}) \neq 0$ $(d_{1,3} = 1; d_{2,3} = 1; x_{3,1} = 1; (x_{1,1} + x_{2,1}) = 1;$ $(x_{4,1} + x_{5,1}) = 1)$	$d_{1,3}d_{2,3}x_{3,1}(x_{1,1} + x_{2,1})(x_{4,1} + x_{5,1}) = 0$ $(d_{1,3} = 1; d_{2,3} = 1; x_{3,1} = 1; (x_{1,1} + x_{2,1}) = 1;$ $(x_{4,1} + x_{5,1}) = 0)$

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:

$$\begin{cases} d_{z,n}d_{q,n}x_{n,k}x_{n,h} \left(\sum_{s=1}^N (d_{z,s}x_{s,k}) + \sum_{s=1}^N (d_{z,s}x_{s,h}) \right) \left(\sum_{r=1}^N (d_{q,r}x_{r,k}) + \sum_{r=1}^N (d_{q,r}x_{r,h}) \right) > 0; \\ d_{z,s}d_{q,s} = 0; \\ d_{z,r}d_{q,r} = 0; \end{cases} \quad (8)$$

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 станция s не находится на пересечении зон устойчивого приема G_z и G_q . Пример проверки выполнения условия (8) дан в табл. 8.

Таблица 8. Пример проверки выполнения условия 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

Условие (9) не выполняется	Условие (9) выполняется
$d_{1,4}d_{2,4}x_{4,2}x_{4,3} \left(\sum_{s=1}^3 (d_{1,s}x_{s,2}) + \sum_{s=1}^3 (d_{1,s}x_{s,3}) \right) \times$ $\times \left(\sum_{r=6}^8 (d_{2,r}x_{r,2}) + \sum_{r=6}^8 (d_{2,r}x_{r,3}) \right) = 0$ $(d_{1,4}d_{2,4}x_{4,2}x_{4,3} = 1;$ $\sum_{s=1}^3 (d_{1,s}x_{s,2}) + \sum_{s=1}^3 (d_{1,s}x_{s,3}) = 2;$ $\sum_{r=6}^8 (d_{2,r}x_{r,2}) + \sum_{r=6}^8 (d_{2,r}x_{r,3}) = 0)$	$d_{1,4}d_{2,4}x_{4,2}x_{4,3} \left(\sum_{s=1}^3 (d_{1,s}x_{s,2}) + \sum_{s=1}^3 (d_{1,s}x_{s,3}) \right) \times$ $\times \left(\sum_{r=6}^8 (d_{2,r}x_{r,2}) + \sum_{r=6}^8 (d_{2,r}x_{r,3}) \right) > 0$ $(d_{1,4}d_{2,4}x_{4,2}x_{4,3} = 1;$ $\sum_{s=1}^3 (d_{1,s}x_{s,2}) + \sum_{s=1}^3 (d_{1,s}x_{s,3}) = 1;$ $\sum_{r=6}^8 (d_{2,r}x_{r,2}) + \sum_{r=6}^8 (d_{2,r}x_{r,3}) = 1)$
	

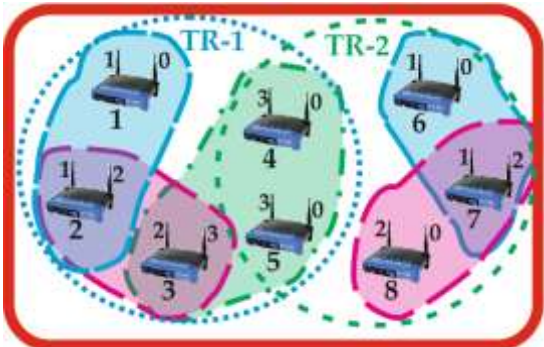
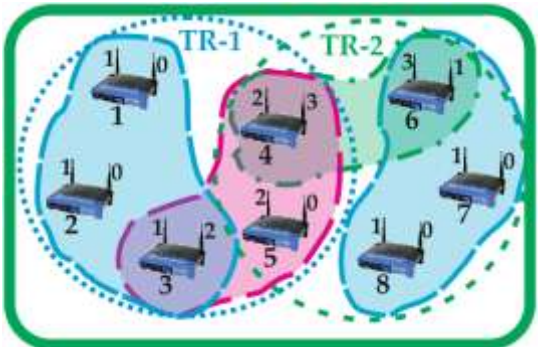
8. Условие работы хотя бы одной из множества mesh-станций, находящихся на пересечении нескольких зон устойчивого приема, более чем на одном ЧК:

$$\sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N (d_{z,n}d_{q,n}x_{n,k}) \geq \sum_{n=1}^N (d_{z,n}d_{q,n}) + 1 \quad (z, q = \overline{1, Z}; z \neq q), \quad (9)$$

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 .

Пример проверки выполнения условия (9) дан в табл. 9.

Таблица 9. Пример проверки выполнения условия работы хотя бы одной из множества mesh-станций, находящихся на пересечении нескольких зон устойчивого приема, более чем на одном ЧК

Условие (8) не выполняется	Условие (8) выполняется
$\sum_{k=1}^3 (d_{1,4}d_{2,4}x_{4,k}) + \sum_{k=1}^3 (d_{1,5}d_{2,5}x_{5,k}) < d_{1,4}d_{2,4} + d_{1,5}d_{2,5} + 1$ $\left(\sum_{k=1}^3 (d_{1,4}d_{2,4}x_{4,k}) = 1; \sum_{k=1}^3 (d_{1,5}d_{2,5}x_{5,k}) = 1; d_{1,4}d_{2,4} = 1; d_{1,5}d_{2,5} = 1\right)$	$\sum_{k=1}^3 (d_{1,4}d_{2,4}x_{4,k}) + \sum_{k=1}^3 (d_{1,5}d_{2,5}x_{5,k}) = d_{1,4}d_{2,4} + d_{1,5}d_{2,5} + 1$ $\left(\sum_{k=1}^3 (d_{1,4}d_{2,4}x_{4,k}) = 2; \sum_{k=1}^3 (d_{1,5}d_{2,5}x_{5,k}) = 1; d_{1,4}d_{2,4} = 1; d_{1,5}d_{2,5} = 1\right)$
	

Выполнение условия (9) совместно с (6)-(8) гарантирует, что число включенных РИ с учетом числа mesh-станций и поддерживаемых в технологии беспроводной связи неперекрывающихся ЧК обеспечит связность многоканальной mesh-сети.

В многоканальной mesh-сети решение задачи распределения ЧК должно обеспечивать минимум или максимум предварительно выбранного критерия соответствия физике решаемой задачи с возможностью получения практически реализуемых решений. В результате этого расчет искомых управляющих переменных (1) целесообразно производить в ходе решения оптимизационной задачи при выполнении условий-ограничений (2)-(9).

При выборе критерия оптимальности необходимо, например, обеспечить минимизацию уровня интерференции, повышение уровня связности mesh-сети и устранение эффекта «скрытой» станции [13]. В работе [16] предложен подход по повышению общей производительности беспроводной mesh-сети, ориентированный на минимизацию количества активных двунаправленных соединений между mesh-станциями. В результате этого критерий оптимальности был представлен в виде

$$\min_x \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K x_{n,k} \quad (10)$$

при учете условий-ограничений (1)-(9). Использование данного критерия позволит избавиться от избыточности при решении задачи распределения ЧК в многоканальной mesh-сети. Указанная избыточность выражается в закреплении ЧК за РИ mesh-

станций сети, которые могли бы и не использоваться. Использование данного критерия оптимизации позволяет снизить уровень интерференции и вероятность возникновения коллизий [16].

Также задача распределения ЧК может быть решена с использованием условия балансировки числа mesh-станций по создаваемым доменам коллизий в зависимости от территориальной удаленности и количества зон устойчивого приема. В работе [13] для представления данного условия использован верхний динамически управляемый порог α числа mesh-станций в произвольно выбранном домене коллизий многоканальной mesh-сети. Выполнение данного условия сопровождается введением дополнительного ограничения на максимальный размер создаваемого домена коллизий и может быть представлено в виде:

$$\sum_{n=1}^N (d_{z,n} x_{n,k}) \leq \alpha \quad (\text{для каждой } (z,k)\text{-пары; } z = \overline{1, Z}; k = \overline{1, K}), \quad (11)$$

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

В результате этого в рамках предложенной математической модели (1)-(9) решение оптимизационной задачи может производиться с использованием следующего критерия:

$$\min_{x, \alpha} \alpha. \quad (12)$$

Задача, сформулированная с использованием условия (11), с точки зрения физики процессов, протекающих в многоканальных mesh-сетях, относится к классу задач балансировки сетевых (частотных) ресурсов.

Окончательный выбор критерия оптимальности, для дальнейшего его использования в рамках предложенной двухиндексной математической модели, должен производиться исходя из результатов оценки качества решений задачи распределения ЧК. Поэтому далее целесообразно проанализировать результаты решения задачи распределения ЧК в MR-МС WMN с целью определения качества полученных решений.

III. Анализ решений задачи распределения частотных каналов в многоканальной mesh-сети стандарта 802.11 при использовании различных критериев оптимальности

С целью оценки качества получаемых решений при распределении ЧК в рамках предложенной модели (1)-(9) рассмотрим различные постановки и решения оптимизационной задачи по распределению ЧК. Для решения задачи распределения ЧК использовались два различных критерия оптимальности:

- в первом случае – минимальное число включенных РИ в mesh-сети (10);

– во втором случае – минимум верхнего динамически управляемого порога числа mesh-станций в произвольно выбранном домене коллизий α (12).

Для анализа результатов решения задачи распределения ЧК в mesh-сети при использовании различных критериев оптимальности в качестве примера была использована конфигурация неоднородной mesh-сети, представленная на рис. 1.

В результате решения задачи распределения ЧК с использованием критерия оптимальности (10) вся mesh-сеть разбивалась на несколько доменов коллизий, т.е. подсетей, в рамках которых все mesh-станции работают на одном и том же ЧК. Результаты решения задачи распределения трех, четырех и пяти ЧК в mesh-сети (рис. 1) приведены на рис. 3.

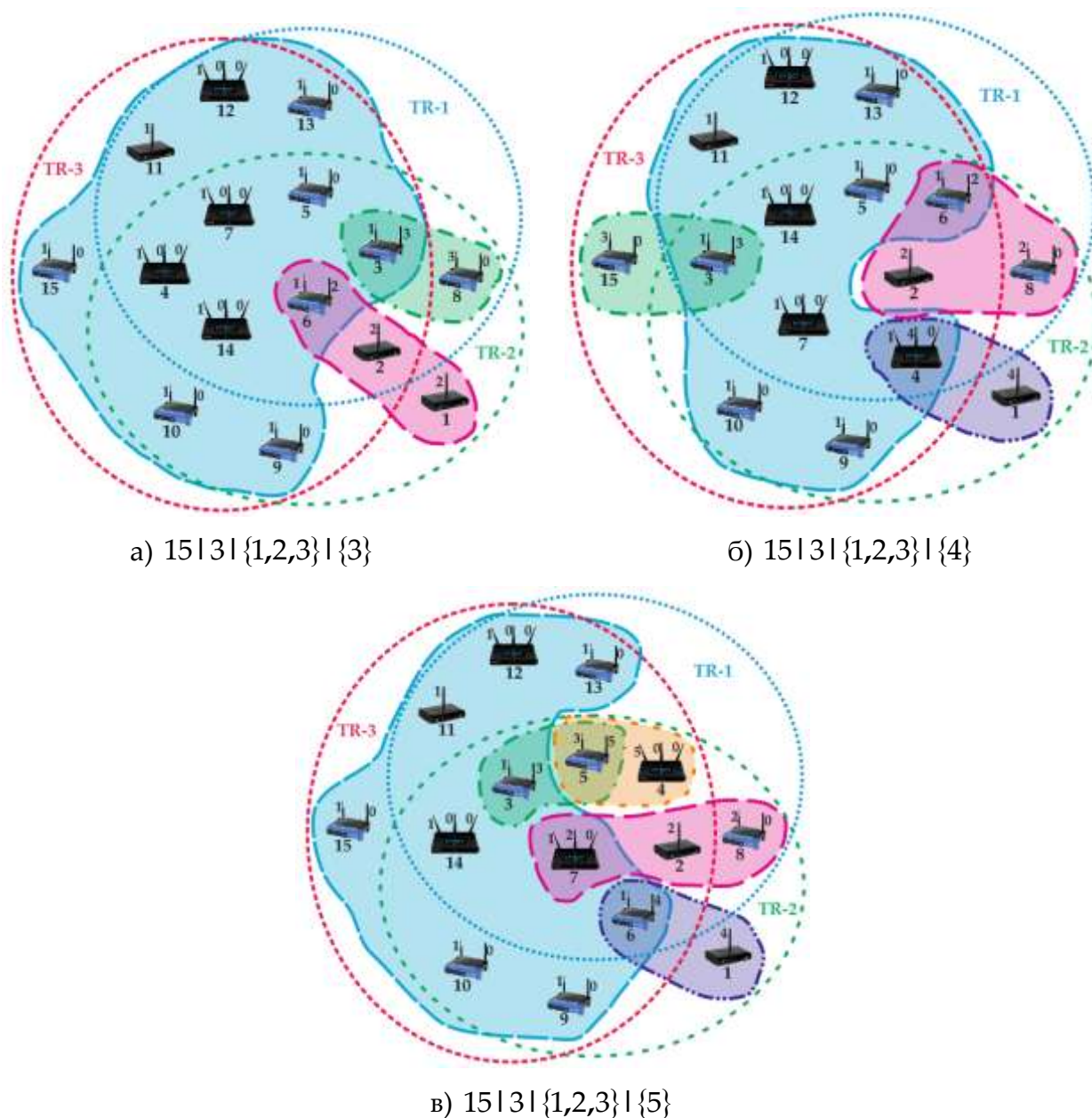


Рис. 3. Пример решения задачи распределения ЧК в mesh-сети с использованием критерия оптимальности (10)

В результате решения задачи распределения трех ЧК между станциями mesh-сети (рис. 3 а) формировалось три домена коллизий, размеры которых составляли соответственно двенадцать, три и две станции. Под размером домена коллизий понималось число mesh-станций в нем. Итого общее число включенных РИ было равно семнадцати. Необходимо заметить, что получаемое решение задачи распределения ЧК несбалансированно относительно размеров создаваемых доменов коллизий. Это приводит к формированию доменов коллизий большого размера. При использовании четырех ЧК (рис. 3 б) mesh-сеть распадалась на четыре домена коллизий, максимальный размер которых составлял одиннадцать mesh-станций. Общее количество включенных РИ составило восемнадцать. При использовании пяти неперекрывающихся ЧК (рис. 3 в) количество включенных РИ составило девятнадцать, а число формируемых доменов коллизий было равно пяти. Максимальный размер создаваемых доменов коллизий при этом был равен десяти mesh-станциям.

Далее представим результаты решения задачи распределения ЧК для рассматриваемого примера возможной конфигурации mesh-сети (рис. 1) при использовании условия балансировки (11) и критерия оптимальности (12), которые приведены на рис. 4. Как видно из полученных результатов, при использовании трех ЧК (рис. 4 а) вся mesh-сеть «распадается» на три домена коллизий, один из которых состоит из четырех mesh-станций, а два из шести. При увеличении числа используемых ЧК до четырех (рис. 4 б) было получено четыре домена коллизий, три из которых состояли из пяти mesh-станций, а один из трёх. С увеличением числа используемых ЧК до пяти сеть «распадалась» на пять доменов коллизий (рис. 4 в), в которых максимальное число станций не превышает четырёх.

На основе анализа решений задачи распределения ЧК между РИ станций mesh-сети можно сделать вывод, что использование критерия оптимальности (12) позволяет сформировать более сбалансированные по размеру домены коллизий (в среднем меньшего размера), по сравнению с решениями, полученными при использовании критерия оптимальности (10).

Также были проведены исследования, направленные на определение зависимости скорости передачи информации (производительности) направления связи между двумя станциями mesh-сети от используемого критерия оптимальности. При этом производительность того или иного направления связи определялась производительностью самого низкоскоростного (наиболее размерного) домена коллизий, через который оно проходит.

Производительность домена коллизий, работающего на k -ом ЧК в z -й TR ($\Pi_{z,k}$) 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 Π – максимальная скорость передачи (пропускная способность), поддерживаемая в используемой технологии беспроводной связи (Мбит/с).

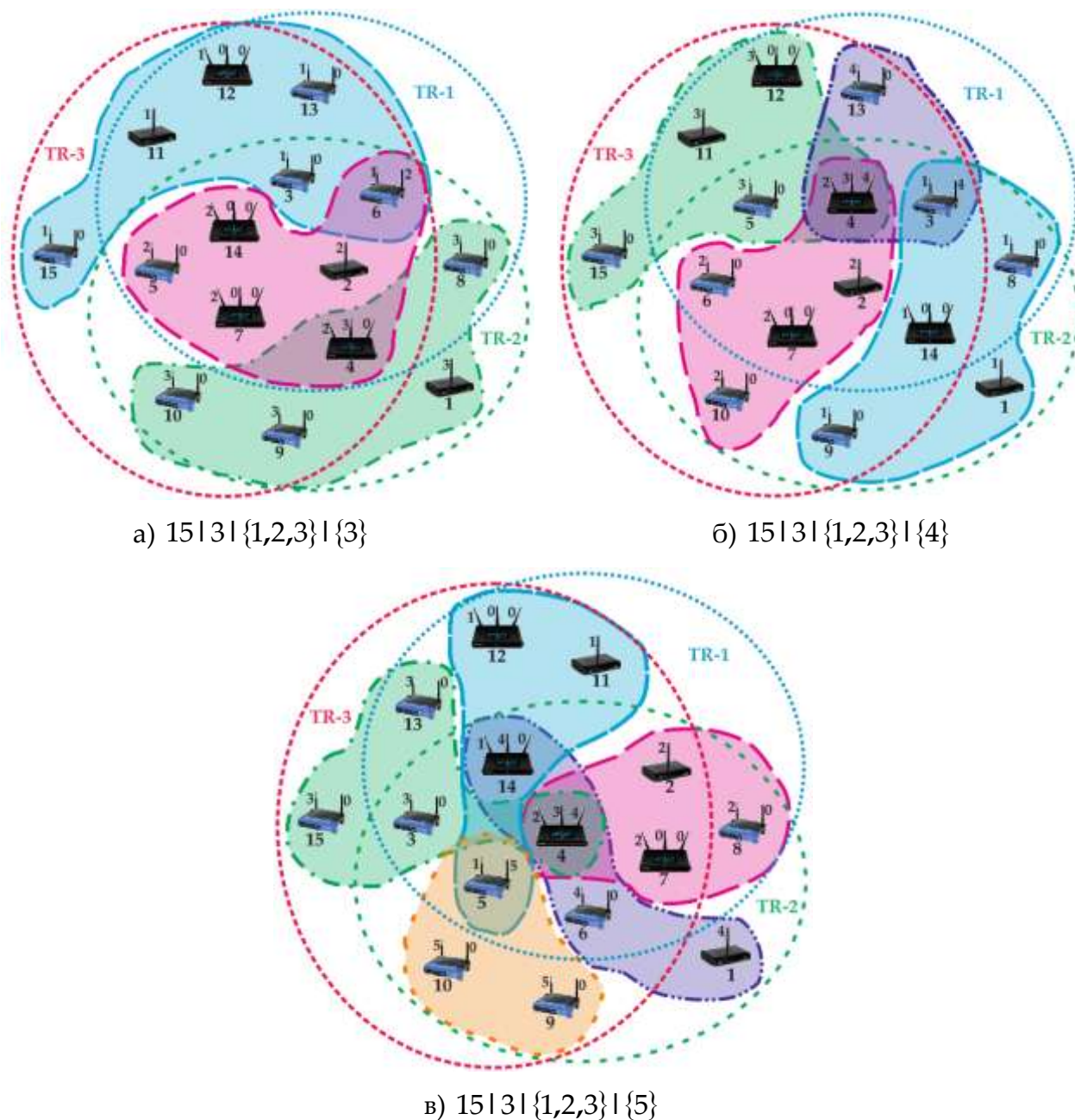


Рис. 4. Пример решения задачи распределения ЧК в mesh-сети с использованием критерия оптимальности (12)

Для количественного представления результатов анализа в качестве примера было использовано направление связи между mesh-станциями №1 и №15 (рис. 3 и 4). Результаты зависимости производительности направления связи между станциями №1 и №15 для различных технологий беспроводной связи и используемых критериев оптимальности представлены в табл. 10.

Таблица 10. Анализ производительности направления связи между mesh-станциями №1 и №15, получаемой в результате решения задачи распределения ЧК

Используемая технология беспроводной связи	Пропускная способность (Мбит/с)	Число используемых неперекрывающихся ЧК	Производительность направления связи (Мбит/с)	
			Критерий оптимальности (10)	Критерий оптимальности (12)
802.11 a	11	3	0,92	1,83
		4	1	2,2
		5	1,1	2,75
802.11 b/g	54	3	4,5	9
		4	4,91	10,8
802.11 n	300	3	25	50
		4	27,27	60

Как показали результаты, представленные в табл. 10, производительности направления связи, получаемые при использовании критерия оптимальности (12), в среднем в два раза превышают аналогичные результаты для критерия оптимальности (10). Также можно сделать вывод, что использование критерия оптимальности (10) позволяет избавиться от интерференционной избыточности при решении задачи распределения ЧК, путем минимизации числа включенных РИ на станциях mesh-сети. Однако это не гарантирует повышение сетевой производительности и результирующих значений остальных показателей качества обслуживания, т.к. получаемые решения являются несбалансированными относительно друг друга, что приводит к формированию доменов коллизий большого размера, которые и определяют общую производительность mesh-сети. Поэтому целесообразно задачу распределения ЧК в многоканальных mesh-сетях решать с использованием условия балансировки (11) и критерия оптимальности (12).

Выводы

В статье предложена двухиндексная математическая модель распределения частотных каналов, которая представлена в виде условий-ограничений (2)-(9). Эта модель, в отличие от ранее известных решений, позволяет обеспечить высокую согласованность при решении класса задач распределения частотных каналов, путем выполнения требований системного характера сформулированных в [13, 23]. Также она имеет более низкую размерность, по сравнению с математической моделью, предложенной в [13]. Размерность математической модели определялась как общее число булевых управляемых переменных в выражении (1). Разработка двухиндексной математической модели позволила снизить размерность задачи распределения

ЧК в $\frac{\sum_{n=1}^N m_n}{N}$ раз по сравнению с трехиндексной математической моделью, предло-

женной в [13]. Например, в случае использования однородной mesh-сети с числом радиоинтерфейсов на каждой из станций равным двум, вычислительная сложность будет уменьшена в два раза.

С точки зрения физики процессов, протекающих в многоканальной mesh-сети, задача распределения частотных каналов в MR-MC WMN относится к классу задач балансировки сетевых ресурсов – числа mesh-станций в доменах коллизий, а с математической точки зрения – это задача смешанного целочисленного нелинейного программирования (Mixed Integer NonLinear Programming, MINLP). В качестве примера было проведено решение сформулированной в работе оптимизационной задачи, для чего была использована система MatLab R2011a, в рамках которой была задействована программа `minlpAssign` пакета оптимизации TOMLAB. В результате решения были получены связанные структуры mesh-сетей, распадающиеся на различное число доменов коллизий.

В статье был проведен анализ решений оптимизационной задачи распределения ЧК в рамках предложенной модели (1)-(9) при использовании двух критериев оптимальности: минимума числа включенных РИ в mesh-сети (10) и минимума верхнего динамически управляемого порога числа mesh-станций в создаваемых доменах коллизий α (12). В ходе анализа было установлено, что использование критерия оптимальности (12), в отличие от критерия оптимальности (10), позволяет сформировать домены коллизий сбалансированно относительно их размера. Балансировки размера создаваемых доменов коллизий удалось добиться путем введения дополнительного условия (11), которое позволяет ограничить максимальный размер создаваемых доменов коллизий. Также результаты анализа свидетельствуют о том, что производительность направлений связи, получаемая при использовании критерия оптимальности (12), в среднем более чем в два раза превышает производительность направлений связи, которую удастся достигнуть при использовании критерия оптимальности (10).

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. 802.11s-2011 IEEE Standard for Information Technology - Telecommunications and information exchange between systems - Local and metropolitan area networks - Specific requirements Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications Amendment 10: Mesh Networking – 2011. – 395 p.
3. *Xu K., Gerla M., Bae S.* Effectiveness of RTS/CTS handshake in IEEE 802.11 based Ad-Hoc networks // *Ad Hoc Networks*. – 2003. – Vol. 1, No.1. – P. 107–123.
4. *Ilyas M.* The handbook of ad hoc wireless networks. – CRC Press, 2003. – 547 p.
5. IEEE P802.11 – TASK GROUP S – MEETINGS UPDATE // Status of Project IEEE 802.11s. Mesh Networking. – Режим доступа: http://grouper.ieee.org/groups/802/11/Reports/tgs_update.htm

6. 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.iip.ru/2008/173-192-2008.pdf>.
7. 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.
8. Raniwala A., Tzi-cker Chiueh. Architecture and algorithms for an IEEE 802.11-based multi-channel wireless mesh network // Proc. of INFOCOM. – 2005. – Vol.3. – P. 2223- 2234.
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. Лемешко А.В., Гоголева М.А. Модель структурной самоорганизации многоканальной mesh-сети стандарта IEEE 802.11 [Электронный ресурс] // Проблемы телекоммуникаций. – 2010. – № 1 (1). – С. 83–95. – Режим доступа к журн.: http://pt.journal.kh.ua/2010/1/1/101_lemeshko_mesh.pdf.
14. 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.
15. 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.
16. 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.
17. 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.
18. 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.
19. 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.
20. 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.

21. *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.

22. *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.

23. *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.