

УДК 621.396.41

С.В. Гаркуша

## Иерархическо-координационный метод распределения частотных каналов в mesh-сети IEEE 802.11 на основе принципа прогнозирования взаимодействий

Усовершенствована математическая модель распределения каналов в многоканальных mesh-сетях путем ее декомпозиции. Усовершенствование модели заключалось в ее дополнении условием идентичного управления станциями, находящимися на пересечении различных зон устойчивого приема и декомпозиционным представлением условий связности mesh-сети. Под зоной устойчивого приема понималось множество mesh-станций максимальной мощности, в рамках которой станции могут передавать информацию друг другу, т.е. могут обмениваться данными с помощью выбранной в mesh-сети технологии беспроводной связи. Декомпозиционная модель обеспечила относительную независимость при решении задач распределения каналов по отдельным зонам устойчивого приема, что напрямую связано с масштабируемостью полученных решений. На базе декомпозиционной модели разработан иерархическо-координационный метод распределения каналов в многоканальных mesh-сетях, в основу которого был положен принцип прогнозирования взаимодействий, наиболее подходящий по технологическим и вычислительным особенностям решаемой задачи. Особенностью метода является введение структурной и функциональной иерархии mesh-станций.

**Ключевые слова:** декомпозиционный метод, иерархически-координационная модель, mesh-сеть, IEEE 802.11, распределение частотных каналов, зона устойчивого приема.

Постоянная модернизация протоколов, проводимая в семействе существующих стандартов IEEE 802.11 a/b/g/n, а также при внедрении нового стандарта IEEE 802.11ac, направлена на повышение производительности беспроводных локальных сетей доступа (Wireless Local Area Networks, WLAN). Значительного повышения производительности можно добиться использованием многошаговых (multi-hop) беспроводных mesh-сетей (Wireless Mesh Networks, WMN) стандарта IEEE 802.11. Одним из эффективных путей повышения производительности mesh-сети стандарта IEEE 802.11 является использование многоканального (Multi-Channel, MC) многоинтерфейсного (Multi-Radio, MR) режима работы. При этом производительность MR-MC WMN стандарта IEEE 802.11 во многом зависит от используемого механизма распределения частотных каналов (ЧК) [1-4]. В связи с тем, что особые проблемы при использовании многоканального режима вызывает перекрываемость соседних каналов одного диапазона, при решении задачи распределения каналов в многоканальных mesh-сетях принято решение в использовании неперекрывающихся ЧК. В качестве неперекрывающихся, например в стандартах IEEE 802.11b/g, выбираются каналы 1, 6, 11 или 1, 5, 9, 13.

Сегодня существует достаточно широкий спектр подходов, позволяющих произвести распределение ЧК в многоканальных mesh-сетях стандарта IEEE 802.11. Доказательством тому служит классификация существующих моделей и методов распределения ЧК в беспроводных mesh-сетях стандарта IEEE 802.11, приведенная в работе [2]. Анализ моделей и методов распределения каналов показал, что централизованное распределение обеспечивает достаточно высокое качество решений по распределению каналов, но создается дополнительный служебный трафик и вносится высокая инерционность при управлении в территориально распределенных mesh-сетях, что заметно снижает масштабируемость практической реализации данных методов [3, 5]. Методы децентрализованного распределения каналов, в свою очередь, обеспечивают высокую масштабируемость получаемых решений, но ввиду отсутствия координации в работе отдельных mesh-станций переназначение каналов вдоль одного соединения в условиях дефицита канального ресурса влечет перераспределение каналов и вдоль других соединений, что не всегда желательно и приводит к низкому качеству решений [6]. Использование гибридных методов [7] частично повышает масштабируемость решения задачи по распределению каналов, однако в данных методах сохраняется ряд недостатков, присущих централизованным и децентрализованным методам.

Особого внимания заслуживает модель централизованного распределения ЧК в MR-МС WMN, представленная в работе [8], в которой произведен наиболее полный учет требований к структуре и содержанию математических моделей 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.

В связи с этим актуальной является реализация идей иерархическо-координационного распределения каналов, в рамках которого удачно сочетаются преимущества централизованных и децентрализованных методов, особенно касающихся качества и масштабируемости получаемых решений. Под масштабируемостью в данном случае понимается способность технологий, протоколов или механизмов управления выполнять возложенные на них функции (сохранять заданную эффективность своей работы) в условиях роста размерности многоканальной mesh-сети (числа mesh-станций), интенсивности поступающего в сеть трафика и изменения территориальной удаленности mesh-станций [9]. Поэтому основное внимание в рамках данной статьи будет уделено разработке иерархическо-координационного метода распределения каналов в многоканальных mesh-сетях, основанного на декомпозиционном представлении математической модели, предложенной в [8].

**Модель централизованного распределения частотных каналов в многоканальной mesh-сети.** В математической модели [8] были 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÷4, в технологии IEEE 802.11a – 12, а в технологии IEEE 802.11ac – 25 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÷3.

В рамках модели [8] 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  $x_{n,k} = \begin{cases} 0, & \text{если } n\text{-я станция не работает на } k\text{-м ЧК;} \\ 1, & \text{если } k\text{-й ЧК на } n\text{-й mesh-станции закреплён только за одним из РИ.} \end{cases}$

Результатом расчета управляющих переменных (1) должно быть разбиение mesh-сети в целом и каждой зоны устойчивого приема в отдельности на связанные 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.

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

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

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 анализируемой mesh-станции), которые работают на  $k$ -м ЧК.

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

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

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

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  $G_q$ .

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  $G_q$ .

Для решения задачи распределения неперекрывающихся ЧК (1)–(9) использован критерий оптимальности (10), гарантирующий минимизацию суммы квадрата произведения числа станций, формирующих домены коллизий в рамках той или иной TR. В ходе исследований установлено, что применение критерия (10) обеспечивает наиболее эффективную балансировку числа mesh-станций по доменам коллизий, в том числе для случая неоднородных конфигураций WMN:

$$\min \sum_{z=1}^Z \sum_{k=1}^K \left[ \sum_{n=1}^N x_{n,k} d_{n,z} \right]^2. \quad (10)$$

Ввиду того, что предложенная математическая модель ориентирована на централизованное решение задачи распределения частотных каналов, с целью повышения масштабируемости полученных решений проведем ее усовершенствование путем использования декомпозиционного подхода.

**Декомпозиционная модель распределения каналов в многоканальных mesh-сетях стандарта 802.11.** В условиях обеспечения согласованного решения задачи распределения ЧК в качестве искомого может выступать следующий вектор:

$$\vec{\bar{x}} = \begin{bmatrix} \bar{x}_1 \\ \bar{x}_2 \\ \vdots \\ \bar{x}_z \\ \vdots \\ \bar{x}_Z \end{bmatrix}, \quad (11)$$

при

$$\vec{\bar{x}}_z = \begin{bmatrix} x_{1,1}^z \\ x_{1,2}^z \\ \vdots \\ x_{n,k}^z \\ \vdots \\ x_{K,N_z}^z \end{bmatrix}, \quad (12)$$

где  $N_z$  – общее число mesh-станций в зоне устойчивого приема  $G_z$ .

Вектор  $\vec{\bar{x}}_z$  (12) характеризует порядок распределения каналов в  $z$ -й зоне устойчивого приема и имеет размерность  $K \times N_z$ . Для  $z$ -й TR-зоны вектор распределения каналов  $\vec{\bar{x}}_z$  также можно представить в декомпозиционном виде:

$$\vec{\bar{x}}_z = \begin{bmatrix} \vec{\bar{x}}_z' \\ \vec{\bar{x}}_z'' \end{bmatrix}, \quad (13)$$

где  $\vec{\bar{x}}_z'$  – вектор распределения каналов между РИ mesh-станций, находящихся только в этой  $z$ -й TR;  $\vec{\bar{x}}_z''$  – вектор распределения каналов между РИ mesh-станций, находящихся кроме  $z$ -й TR одновременно еще и в других (другой) TR. В результате того, что в каждой TR возможен свой порядок распределения ЧК, результатом расчета вектора (13) является порядок распределения каналов между станциями в  $z$ -й зоне устойчивого приема mesh-сети.

С целью обеспечения идентичного управления ресурсами mesh-станций, находящихся одновременно в нескольких зонах устойчивого приема, введем следующее условие на взаимодействие станций, находящихся в разных зонах устойчивого приема [10]:

$$\bar{x}_z'' = \sum_{\substack{y=1, \\ y \neq z}}^Z C_{zy} \bar{x}_y'', \quad z = \overline{1, Z}. \quad (14)$$

С помощью данного условия осуществляется согласованное управление станциями, которые могут обеспечивать связность зон устойчивого приема.

Для обеспечения связности создаваемых доменов коллизий mesh-станций используем условие (6). Однако ввиду того, что данное условие имеет отношение к станции, которая находится в нескольких доменах коллизий, в дальнейшем понадобится его декомпозиционное представление. Для этого левую часть условия (6), которая численно характеризует число включенных радиointерфейсов в mesh-сети, запишем в виде

$$\sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N x_{n,k} = \sum_{z=1}^Z E_z^t \bar{x}_z, \quad (15)$$

где  $E_z$  ( $z = \overline{1, Z}$ ) – состоящие из нулей и единиц векторы размерности  $N_z \times 1$ , структура которых выбирается таким образом, чтобы суммирование включенных РИ mesh-станций, находящихся одновременно в нескольких TR, осуществлялось лишь один раз.

Тогда с учетом равенства (15) условие (6) удобно представить в следующем виде:

$$-E_z^t \bar{x}_z \leq \sum_{\substack{r=1, \\ r \neq z}}^Z E_r^t \bar{x}_r - |G_z| - K + 1 + b. \quad (16)$$

Для управления mesh-станциями, находящимися в одной зоне устойчивого приема, в декомпозиционной модели, как и в модели централизованного распределения частотных каналов [8], также присутствуют условия-ограничения (2)–(5). Их выполнение нацелено на учет требований, которым должны удовлетворять математические модели распределения каналов в многоканальных mesh-сетях. Условия (2)–(5) не нуждаются в декомпозиции ввиду отношения их к одной mesh-станции или станциям одной зоны устойчивого приема.

В ходе расчета вектора искомым переменных (13) в качестве критерия оптимальности получаемых решений выберем экстремум целевой функции, основным требованием к которой является учет технологических особенностей решаемой задачи и возможность представления в аддитивной форме. Примером может служить следующая квадратичная функция:

$$\min_x F \quad \text{при} \quad F = \sum_{z=1}^Z \sum_{k=1}^K \left[ \sum_{n=1}^N x_{n,k} d_{n,z} \right]^2. \quad (17)$$

По аналогии с (10) применение целевой функции вида (19) направлено на минимизацию количества станций, входящих в состав каждого отдельно взятого домена коллизий, что позволяет организовать процесс балансировки производительности беспроводной mesh-сети.

Таким образом, в рамках предложенной декомпозиционной модели (2)–(5), (7), (8), (11)–(17) обеспечивается согласованное решение частных задач распределения каналов в mesh-сети: кластеризации, выделения станций и закрепления за ними неперекрывающихся ЧК. Кроме того, декомпозиционное представление задачи распределения неперекрывающихся ЧК позволило обеспечить относительную независимость при формулировке и последующем решении задач распределения каналов по отдельным зонам устойчивого приема, что напрямую связано с масштабируемостью получаемых решений по распределению ЧК с многоканальных mesh-сетей стандарта IEEE 802.11.

**Метод двухуровневого распределения каналов в многоканальных mesh-сетях стандарта IEEE 802.11 на основе принципа прогнозирования взаимодействий.** В ходе реализации иерархически-координационного подхода при решении задачи распределения ЧК в mesh-сети важным является этап многоуровневого представления как структуры сети, так и ее функций с точки зрения их распределения между уровнем координатора сети, уровнем TR-координаторов и уровнем mesh-станций. При этом необходимо придерживаться основных принципов и постулатов координируемости и совместимости задач различных уровней иерархии [9, 10].

В этой связи для иерархическо-координационного решения задачи распределения каналов, предполагая моделями (1)–(10) и (11)–(17), среди всего множества mesh-станций  $\{R_i, i = \overline{1, N}\}$  для каждой

из TR  $\{G_z, z=\overline{1, Z}\}$  выделим станцию-координатор (TR-координатор), отвечающий за расчет вектора (12), а также назначим координатор для mesh-сети в целом. Задачей координатора mesh-сети является координация решений (12) с целью обеспечения выполнения условий (14) и (16), а также обеспечения выполнения условий (7) и (8), которые не могут быть приведены к декомпозиционному виду, ввиду их нелинейного характера. Таким образом, нулевой уровень иерархии распределения каналов в mesh-сети образуют сами mesh-станции, первый уровень – TR-координаторы, а второй уровень – координатор сети в целом (рис. 1).

Главный координатор mesh-сети представляет собой mesh-станцию, на которую возложены функции координации на верхнем уровне и которая связана логически со всеми TR-координаторами, т.е. территориально координатор может находиться в любой зоне устойчивого приема.

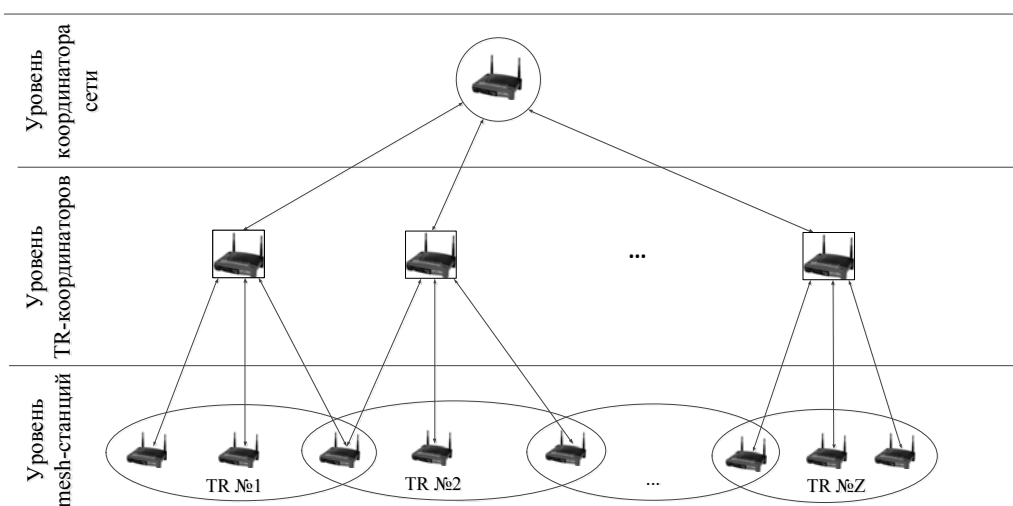


Рис. 1. Многоуровневая иерархия mesh-сети

В основу предлагаемого метода будет положено решение оптимизационной задачи, направленной на минимизацию целевой функции (17) при наличии условий ограничений (3)–(5), (7)–(9), (11)–(16). В ходе решения задачи условной оптимизации (19) с целью учета условий на взаимодействие станций, находящихся на пересечении нескольких зон устойчивого приема, необходимо перейти к задаче на безусловный экстремум. Поэтому при учете содержания условий (14) и (16) в ходе минимизации функции (17) перейдем к двойственной задаче по максимизации лагранжиана [9, 10]:

$$\min_x F = \max_{\lambda, \mu} L, \quad (18)$$

где

$$L = \sum_{z=1}^Z \sum_{k=1}^K \left[ \sum_{n=1}^N x_{n,k} d_{n,z} \right]^2 + \sum_{z=1}^Z \tilde{\lambda}_z^t \left[ \bar{x}_z'' - \sum_{\substack{y=1, \\ y \neq z}}^Z C_{zy} \bar{x}_y'' \right] + \sum_{z=1}^Z \mu_z^t \left[ -E_z^t \bar{x}_z - \sum_{\substack{r=1, \\ r \neq z}}^Z E_r^t \bar{x}_r + |G_z| + K - 1 - b \right], \quad (19)$$

где  $\mu$  – множитель Лагранжа,  $\tilde{\lambda}$  – вектор множителей Лагранжа.

В зависимости от содержания задач верхнего уровня могут быть использованы принципы целевой координации, прогнозирования взаимодействий и оценки взаимодействий [9, 10].

Использование принципа целевой координации [10] позволяет разгрузить работу уровня координатора сети, загружая при этом уровень TR-координаторов, так как минимизация (19) будет осуществляться по переменным  $\bar{x}_z'$  и  $\bar{x}_z''$ . Однако так как условия-ограничения (7) и (8) ввиду своего нелинейного характера не могут быть представлены в декомпозиционном виде, их выполнение должно обеспечиваться на уровне координатора сети, что не может быть обеспечено принципом целевой координации.

В соответствии с принципом прогнозирования взаимодействий [9, 10] в качестве координирующих переменных выступают векторы  $\tilde{\lambda}$ ,  $\mu$  и  $\bar{x}_z''$ , что несколько усложняет работу уровня коор-

динатора сети, по сравнению с принципом целевой координации, но разгружает уровень TR-координаторов, так как минимизация (19) осуществляется лишь по переменным  $\bar{\mathbf{x}}_z'$ . Использование принципа прогнозирования взаимодействий подразумевает решения задачи верхнего уровня по расчету  $\bar{\lambda}$ ,  $\mu$  и  $\bar{\mathbf{x}}_z''$  при фиксированных значениях векторной переменной  $\bar{\mathbf{x}}_z'$ , рассчитанной на уровне TR-координаторов [13]. Кроме того, станцией-координатором сети будет производиться проверка условий-ограничений (7) и (8) на предмет их выполнения для рассчитываемых векторов переменных  $\bar{\mathbf{x}}_z'$  и  $\bar{\mathbf{x}}_z''$ .

В рамках принципа оценки взаимодействий [10] в отличие от принципа прогнозирования взаимодействий на уровне координатора сети осуществляется лишь определение границ для варьирования численных значений вектора  $\bar{\mathbf{x}}_z''$  в ходе решения оптимизационной задачи (19) на уровне TR-координаторов по переменным  $\bar{\mathbf{x}}_z'$  и  $\bar{\mathbf{x}}_z''$ .

Таким образом, в работе использован принцип прогнозирования взаимодействий [12, 14], выбор которого обусловлен необходимостью обеспечения связности mesh-сети при решении задачи распределения ЧК на уровне координатора сети, путем выполнения условий-ограничений (7) и (8), а также определение оптимальных значений  $\bar{\lambda}$  и  $\mu$  для достижения минимума критерия оптимальности (17). Кроме того, достаточно трудоемкий расчет векторов  $\bar{\mathbf{x}}_z'$  и  $\bar{\mathbf{x}}_z''$  осуществляется на нижнем уровне в ходе максимизации выражения (19).

Для решения сформулированной оптимизационной задачи, в соответствии с принципом прогнозирования взаимодействий [11, 12], лагранжиан (19) с учетом тождеств

$$\sum_{z=1}^Z \bar{\lambda}_z^t \sum_{\substack{y=1 \\ y \neq z}}^Z C_{zy} \bar{\mathbf{x}}_y'' = \sum_{z=1}^Z \sum_{\substack{r=1 \\ r \neq z}}^Z \bar{\lambda}_z^t C_{zy} \bar{\mathbf{x}}_y'' \quad \text{и} \quad \sum_{z=1}^Z \bar{\mu}_z^t \sum_{\substack{r=1 \\ r \neq z}}^Z E_r^t \bar{\mathbf{x}}_r = \sum_{z=1}^Z \sum_{\substack{r=1 \\ r \neq z}}^Z \bar{\mu}_z^t E_r^t \bar{\mathbf{x}}_r$$

представим в виде

$$L = \sum_{k=1}^K \left[ \sum_{n=1}^N x_{n,k} d_{n,z} \right]^2 + \sum_{z=1}^Z \bar{\lambda}_z^t \bar{\mathbf{x}}_z'' - \sum_{z=1}^Z \sum_{\substack{y=1, \\ y \neq z}}^Z \left[ \bar{\lambda}_y^t C_{yz} \right] \bar{\mathbf{x}}_z'' + \sum_{z=1}^Z \bar{\mu}_z^t \left[ -E_z^t \bar{\mathbf{x}}_z + |G_z| + K - 1 - b \right] - \sum_{z=1}^Z \sum_{\substack{r=1, \\ r \neq z}}^Z \bar{\mu}_z^t \left[ E_r^t \bar{\mathbf{x}}_r \right]. \quad (20)$$

Тогда для фиксированных множителей Лагранжа ( $\bar{\lambda}^*$  и  $\bar{\mu}^*$ ), вычисляемых на втором уровне иерархии, выражение (20) может быть представлено в форме

$$L = \sum_{z=1}^Z L_z, \quad (21)$$

$$L_z = \sum_{k=1}^K \left[ \sum_{n=1}^N x_{n,k} d_{n,z} \right]^2 + \bar{\lambda}_z^* \bar{\mathbf{x}}_z'' - \sum_{\substack{y=1, \\ y \neq z}}^Z \left[ \bar{\lambda}_y^* C_{yz} \right] \bar{\mathbf{x}}_z'' + \bar{\mu}_z^* \left[ -E_z^t \bar{\mathbf{x}}_z + |G_z| + K - 1 - b \right] - \sum_{\substack{r=1, \\ r \neq z}}^Z \bar{\mu}_z^* \left[ E_r^t \bar{\mathbf{x}}_r \right]. \quad (22)$$

Отметим, что каждая из составляющих  $L_z$  является функцией векторов состояния, управления, взаимодействия подсетей и векторов множителей Лагранжа, которые относятся только к  $z$ -й зоне устойчивого приема. Таким образом, в соответствии с проведенными преобразованиями задача оптимального распределения каналов в многоканальной mesh-сети в целом оказалась декомпозированной на  $Z$  подзадач, каждая из которых может решаться TR-координаторами различных зон устойчивого приема независимо друг от друга. Решение оптимизационных задач (22) обуславливает уровень TR-координаторов решением оптимизационной задачи (17).

С учетом функциональной иерархии многоканальной mesh-сети вычислительная структура иерархическо-координационного метода распределения каналов представлена на рис. 2.

В соответствии с разработанным методом TR-координаторами осуществляются:

– сбор и обработка информации о состоянии mesh-станций, принадлежащих этой зоне устойчивого приема. Информация, подлежащая мониторингу, включает в себя следующие данные: тип используемой технологии IEEE 802.11 a/b/g/n на mesh-станциях, количество радиointерфейсов на каждой станции, загруженность (активность) станций;

- определение порядка распределения каналов между радиointерфейсами mesh-станций в вверенной зоне устойчивого приема путем максимизации соответствующих лагранжианов, представленным выражением (22), и расчета векторов  $\bar{x}_z$  ( $z \in Z$ );
- обеспечение связности доменов коллизий, находящихся в разных зонах устойчивого приема.

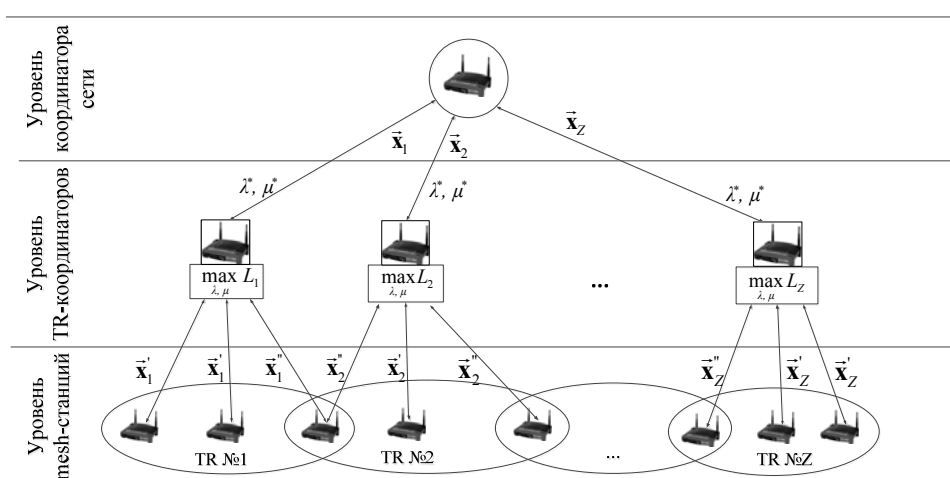


Рис. 2. Вычислительная структура иерархическо-координационного метода распределения каналов

В результате решения задачи уровня TR-координаторов условий (2)–(6), (9), (14) и (16), каждая зона устойчивого приема разбивается на связные домены коллизий (количество которых не превышает количества неперекрывающихся каналов в поддерживаемой технологии). С целью обеспечения идентичного управления и связности доменов коллизий решения, полученные на этом уровне, подлежат координации со стороны координатора сети в целом. Основной задачей на уровне координатора сети является координация решений, полученных на уровне TR-координаторов с целью обеспечения связности доменов коллизий, находящихся в разных TR, и идентичного управления mesh-станциями, находящимися одновременно в разных зонах устойчивого приема.

С технологической точки зрения применение иерархическо-координационного метода способствовало минимизации инерционности управления и объемов информации о состоянии mesh-сети, которую необходимо постоянно обновлять в ходе оптимизации распределения каналов, а в итоге свидетельствовало о повышении масштабируемости полученных в работе решений. Так как существенно снижается размерность задач нижнего уровня с пропорциональным снижением объемов циркулирующей в сети служебной информации о ее состоянии, повышается оперативность в решении задач распределения каналов без существенного снижения качества получаемых решений.

В качестве примера продемонстрируем работу предложенного метода в рамках следующих исходных данных (рис. 3): количество зон устойчивого приема –  $Z=3$ ; число mesh-станций в сети –  $N=15$ ; количество станций в зоне устойчивого приема TR-1 –  $|G_1|=3$ , TR-2 –  $|G_2|=4$  и TR-3 –  $|G_3|=9$ ; число используемых неперекрывающихся частотных каналов –  $K=4$ ; количество радиointерфейсов на всех mesh-станциях –  $m_n=2$ . В каждой зоне устойчивого приема выделялась станция – TR-координатор. В данном случае TR-координаторами выступали станции №3, №5 и №8. Кроме того, в качестве главного координатора выделена станция №11, принадлежащая третьей зоне устойчивого приема. Станции-координаторы отвечают за разбиение зоны устойчивого приема на связные домены коллизий, а главный координатор – за идентичное управление станциями, находящимися одновременно в разных TR.

Результаты моделирования задачи распределения четырех неперекрывающихся частотных каналов с использованием предложенного иерархическо-координационного метода, приведены на рис. 4. В результате решения задачи распределения четырех ЧК между станциями однородной mesh-сети с использованием критерия оптимальности (11) формировалось восемь доменов коллизий, количество станций в каждом из которых было минимально. При этом количество станций, формирующих один домен коллизий, в TR-3 не превышало четырех станций, в TR-2 – трех станций, а в TR-1 количество станций, формирующих каждый домен коллизий, было минимально и составляло



две станции. Формирование доменов коллизий минимальных размеров производится в соответствии с критерием оптимальности (17), который был предложен в работе [8]. Кроме того в работе [8] показано, что использование критерия (17) обеспечивает эффективную балансировку числа mesh-станций по доменам коллизий, в том числе для случая неоднородных конфигураций WMN.

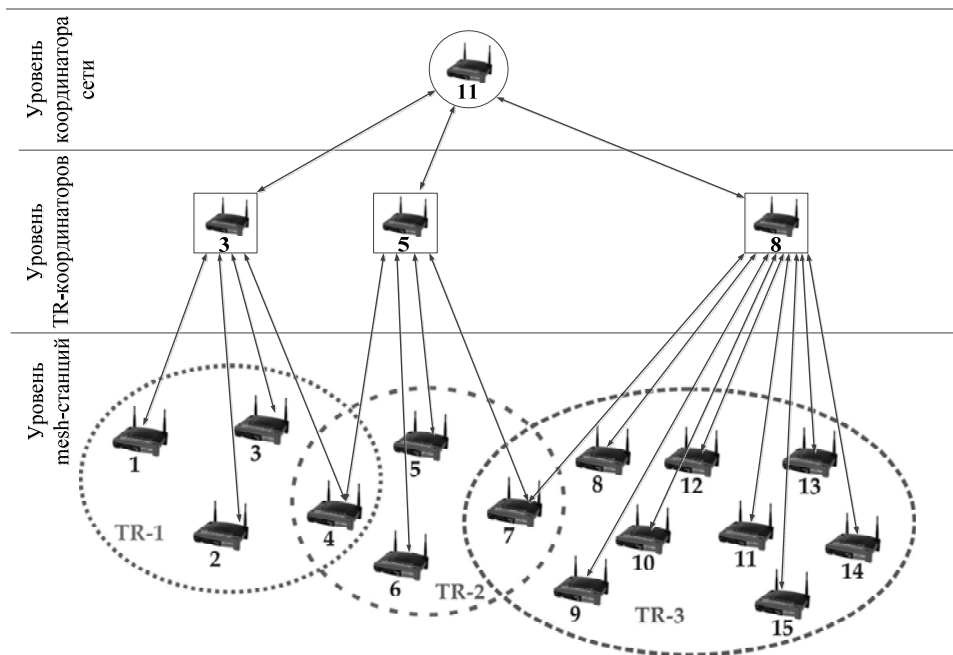


Рис. 3. Пример возможной конфигурации mesh-сети

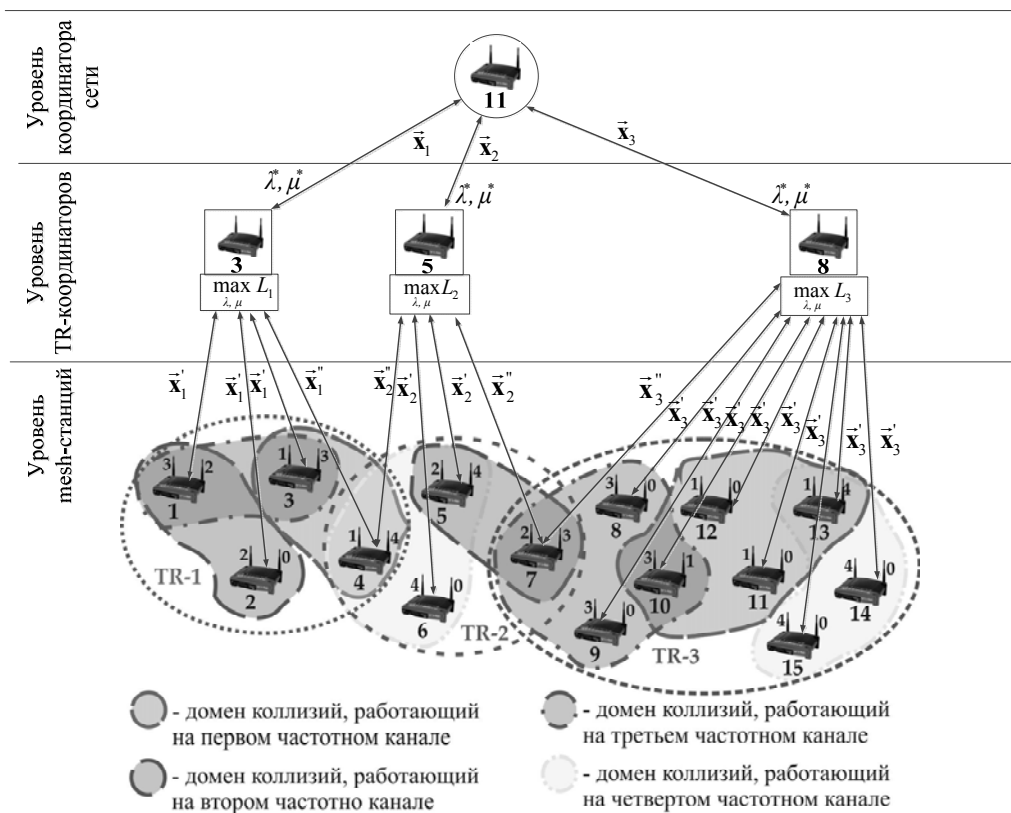


Рис. 4. Пример решения задачи распределения ЧК в mesh-сети с указанием доменов коллизий

Таким образом, с целью повышения масштабируемости полученных решений предложены декомпозиционная модель и иерархическо-координационный метод распределения каналов в много-

канальных mesh-сетях. При использовании предложенных в разделе решений значительно сокращалась размерность задачи первого уровня без существенной нагрузки средств второго уровня. С технологической точки зрения это способствовало минимизации инерционности управления и объемов информации о состоянии mesh-сети, которую необходимо постоянно обновлять в ходе оптимизации распределения каналов, а в итоге свидетельствовало о повышении масштабируемости полученных в работе решений.

**Заключение.** С целью повышения масштабируемости полученных решений усовершенствованная математическая модель распределения каналов в многоканальных mesh-сетях путем ее декомпозиции. Усовершенствование модели заключалось в ее дополнении условием идентичного управления станциями, находящимися одновременно в нескольких зонах устойчивого приема, и декомпозиционным представлением условий связности mesh-сети. Декомпозиционная модель обеспечила относительную независимость при решении задач распределения каналов по отдельным зонам устойчивого приема, что напрямую связано с масштабируемостью полученных решений.

На базе декомпозиционной модели разработан иерархическо-координационный метод распределения каналов в многоканальных mesh-сетях, в основу которого был положен принцип прогнозирования взаимодействий, наиболее подходящий по технологическим и вычислительным особенностям решаемой задачи. Особенностью метода является введение структурной и функциональной иерархии mesh-станций. При этом при использовании предложенного метода распределения каналов значительно сокращается размерность задачи первого уровня без существенной нагрузки координаторов второго уровня. С технологической точки зрения это способствовало минимизации инерционности управления и объемов информации о состоянии mesh-сети, которую необходимо постоянно обновлять в ходе оптимизации распределения каналов, а в итоге свидетельствовало о повышении масштабируемости полученных в работе решений.

#### *Литература*

1. Лемешко А.В. Классификация методов распределения частотных каналов в многоинтерфейсных многоканальных mesh-сетях стандарта IEEE 802.11 [Электронный ресурс] / А.В. Лемешко, С.В. Гаркуша // Проблемы телекоммуникаций. – 2011. – № 2 (4). – С. 139–149. – Режим доступа: [http://pt.journal.kh.ua/2011/2/1/12\\_lemeshko\\_classification.pdf](http://pt.journal.kh.ua/2011/2/1/12_lemeshko_classification.pdf), свободный (дата обращения: 10.02.2014).
2. Лемешко А.В. Модель структурной самоорганизации многоканальной mesh-сети стандарта IEEE 802.11 [Электронный ресурс] / А.В. Лемешко, М.А. Гоголева // Проблемы телекоммуникаций. – 2010. – № 1 (1). – С. 83–95. – Режим доступа: [http://pt.journal.kh.ua/2010/1/1/101\\_lemeshko\\_mesh.pdf](http://pt.journal.kh.ua/2010/1/1/101_lemeshko_mesh.pdf), свободный (дата обращения: 10.02.2014).
3. 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. 38–57. – Режим доступа: [http://pt.journal.kh.ua/2011/3/1/113\\_garkusha\\_mesh.pdf](http://pt.journal.kh.ua/2011/3/1/113_garkusha_mesh.pdf), свободный (дата обращения: 10.02.2014).
4. Гаркуша С.В. Анализ результатов распределения частотных каналов в многоканальных многоинтерфейсных mesh-сетях стандарта IEEE 802.11 // Цифровые технологии: Сб. научных трудов. – 2011. – Вып. 10. – С. 27–42.
5. A multiple-State Based Power Control for Multi-Radio Multi-Channel Wireless Mesh Networks / T.O. Olwal, F.O. Aron, B.J. Van Wyk et al. // International Journal of Computer Science. – Vol. 4, no. 1. – 2009. – P. 53–61.
6. Raniwala A. Architecture and algorithms for an IEEE 802.11-based multi-channel wireless mesh network / A. Raniwala, Tzicker Chiueh // Proc. of INFOCOM '05. – 2005. – Vol. 3. – P. 2223–2234.
7. Ляхов А.И. Многоканальные mesh-сети: анализ подходов и оценка производительности / А.И. Ляхов, И.А. Пустогаров, С.А. Шпилев // Информационные процессы. – 2008. – Т. 8, № 3. – С. 173–192.
8. Гаркуша С.В. Сравнительный анализ критериев оптимальности распределения частотных каналов в mesh-сети IEEE 802.11 / С.В. Гаркуша, Е.В. Гаркуша // Системы управления навигации и связи. – 2012. – Вып. 4(24) – С. 125–131.
9. Месарович М. Теория иерархических многоуровневых систем / М. Месарович, Д. Мако, И. Такаха. – М.: Мир, 1973. – 332 с.
10. Сингх М. Системы: декомпозиция, оптимизация и управление / М. Сингх, А. Титли. – М.: Машиностроение, 1986. – 494 с.

11. Дансмор Б. Справочник по телекоммуникационным технологиям: пер. с англ. / Б. Дансмор, Т. Скандьер – М.: Изд. дом «Вильямс», 2004. – 640 с.
12. Беленков А.Г. Метод распределения нагрузки в иерархических телекоммуникационных сетях на базе декомпозиционных принципов предсказания взаимодействий и целевой координации / А.Г. Беленков, О.Ю. Евсеева, А.В. Лемешко // Труды УНИИРТ. – 2005. – №2(42). – С. 11–16.
13. Лемешко А.В. Иерархическо-координационное распределение частотных каналов в многоканальных mesh-сетях стандарта IEEE 802.11x / А.В. Лемешко, М.А. Гоголева // Системы управления, навигации и связи. – 2010. – Вып. 1(13) – С. 200–204.
14. Поповский В.В. Математичні основи теорії телекомунікаційних систем / под общ. ред. В.В. Поповского. – Харьков: ООО «Компания СМІТ», 2006. – 564 с.

---

**Гаркуша Сергей Владимирович**

Канд. техн. наук, доцент каф. документоведения и информационной деятельности в экономических системах Полтавского университета экономики и торговли, Украина  
Тел.: +38 (053-22) 2-16-71  
Эл. почта: sv.garkusha@mail.ru

Garkusha S.V.

**Hierarchical-coordination method distribution frequency channels in mesh-network IEEE 802.11 based on the principle of predicting the interactions**

The mathematical model of the distribution channels in multi-channel mesh-networks by its decomposition. Improvement of the model was its complement condition identical control stations located in several transmissions ranges conditions and a decomposition representation connected mesh-network. Decomposition model has provided a degree of independence in solving problems of distribution channels on separate transmission ranges is directly related to the scalability of the solutions. Based on the decomposition model developed hierarchical method of clearing the channel distribution in multi-channel mesh-networks, which was based on the principle of predicting the interactions, the most suitable for technological and computational characteristics of the problem being solved. Feature of the method is the introduction of the structural and functional hierarchy mesh-stations.

**Keywords:** decomposition method, hierarchical-coordination model, mesh-network, IEEE 802.11, distribution of frequency channels, transmission range.