

УДК 621.391

МОДЕЛЬ СТРУКТУРНОЙ САМООРГАНИЗАЦИИ МНОГОКАНАЛЬНОЙ MESH-СЕТИ СТАНДАРТА IEEE 802.11



[А.В. ЛЕМЕШКО](#)

[М.А. ГОГОЛЕВА](#)

Харьковский национальный
университет радиоэлектроники

У статті пропонується математична модель структурної самоорганізації багатоканальної mesh-мережі стандарту IEEE 802.11. Використання моделі дозволить запобігти ефекту «прихованої станції» та погоджено розв'язати задачі щодо виділення радіоінтерфейсів на mesh-станціях та закріплення за ними каналів, що не перекриваються.

The paper proposes a mathematical model of structural self-mesh-network standard IEEE 802.11. Using of the model will prevent the effect of "hidden station" and simultaneously solve the problems of allocating radio for mesh-stations and assigning to them non-overlapping channels.

В статье предлагается математическая модель структурной самоорганизации mesh-сети стандарта IEEE 802.11. Использование модели позволит предотвратить эффект «скрытой станции» и согласованно решить задачи выделения радиоинтерфейсов на mesh-станциях и закрепление за ними неперекрывающихся каналов.

Введение

С целью повышения производительности и улучшения основных показателей качества обслуживания современные телекоммуникационные сети (ТКС) должны строиться на принципах структурной и функциональной самоорганизации [1]. Реализация идей самоорганизации позволяет адаптивно, оперативно, а главное эффективно реагировать на всевозможные изменения состояния и условий функционирования ТКС, продиктованные, например, выходом из строя или перегрузкой элементов сети, колебаниями поступающего в сеть трафика, динамикой изменения сигнально-помеховой обстановки и т.д. Высокий уровень самоорганизации может быть обеспечен за счет усовершенствования соответствующих сетевых протоколов и механизмов, отвечающих за распределение доступных сетевых ресурсов. К подобного рода ресурсам, прежде всего, относятся сетевой трафик (*информационный ресурс*), пропускные способности каналов связи (*канальный ресурс*), очереди (*буферный ресурс*), а также частоты или частотные каналы (*частотный ресурс*), что особенно важно для беспроводных сетей.

В этой связи в статье предлагается математическая модель структурной самоорганизации беспроводной ТКС, относящейся к классу многоканальных mesh-сетей, функционирующих на основе стека стандартов IEEE 802.11a/b/g/n/s. При этом структурная самоорганизация будет основываться на периодическом (или по требованию) решении задач распределения частотных каналов (ЧК) между радиоинтерфейсами

(РИ) mesh-станций с учетом особенностей частотного планирования, используемого в технологии беспроводной связи (ТБС), т.е. числа неперекрывающихся ЧК и их общего количества.

I. Особенности частотного планирования в многоканальных mesh-сетях стандарта IEEE 802.11

Для минимизации создаваемых различными станциями взаимных помех в стандартах IEEE 802.11a/b/g/n предусмотрено деление диапазона используемых частот на ряд каналов, причем для IEEE 802.11b/g в полосе частот 2.4 ГГц выделены 14 каналов (*channel*), центральные частоты (*center frequency*) которых назначаются преимущественно с интервалом 5 МГц (рис. 1).

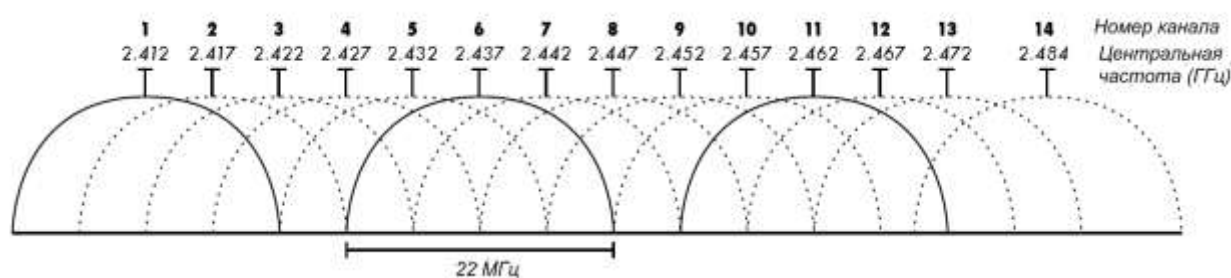


Рис. 1. Порядок использования частотных каналов в диапазоне 2.4 ГГц (IEEE 802.11b/g)

Анализируя особенности частотного планирования в серии стандартов IEEE 802.11 [1, 7], необходимо отметить, что в разных странах с учетом лицензирования частот используется разное количество каналов. Так, в Соединенных Штатах Америки и Канаде в диапазоне 2.4 ГГц доступны каналы 1÷11, для большинства стран Европы для технологий IEEE 802.11b/g доступны каналы 1÷13, а в Японии разрешается использование всех 14-ти каналов, но 14-й канал закреплен только за стандартом 802.11 g/n.

Однако в связи с тем, что ширина одного канала в технологиях IEEE 802.11b/g составляет около 20-22 МГц, а спектральная маска (рис. 2), например, стандарта IEEE 802.11b требует, чтобы сигнал был ослаблен, по меньшей мере, на 30дБ от своего пика энергии в 11 МГц от центральной частоты [8]. При этом между центральными частотами неперекрывающихся каналов минимальный интервал должен составлять не менее 22 МГц. Таким образом, в данном частотном диапазоне можно использовать три неперекрывающихся частотных канала. К примеру, первый канал занимает частотный диапазон от 2400 до 2423 МГц и центрирован относительно частоты 2412 МГц. Второй канал центрирован относительно частоты 2417 МГц, а последний, 11-й канал – относительно частоты 2462 МГц. При таком рассмотрении 1, 6 и 11-й каналы не перекрываются друг с другом и имеют 3-мегагерцевый зазор друг относительно друга. Если зазором пренебречь, то можно использовать четыре неперекрывающихся канала.

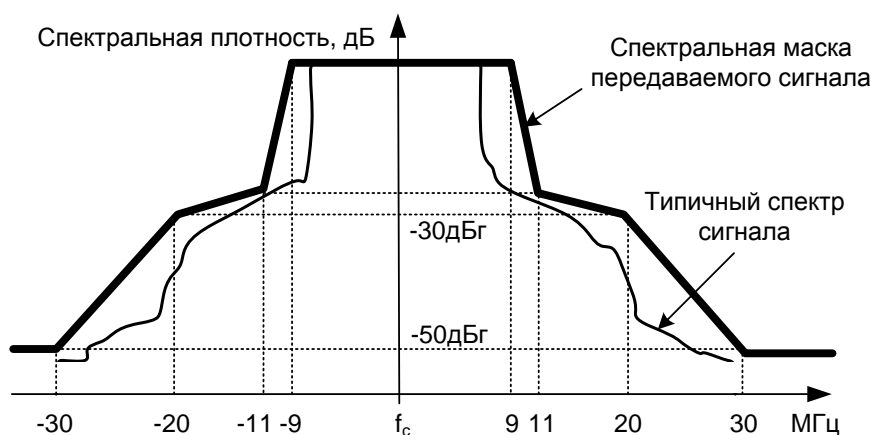


Рис. 2. Спектральная маска передаваемого сигнала в IEEE 802.11 b/g

В свою очередь, в соответствии со стандартом IEEE 802.11a частотный диапазон разбит на три 100-мегагерцевых поддиапазона [7, 8], различающихся ограничениями по максимальной мощности излучения. Нижний диапазон (от 5,15 до 5,25 ГГц) предусматривает мощность всего 50 мВт, средний (от 5,25 до 5,35 ГГц) – 250 мВт, а верхний (от 5,725 до 5,825 ГГц) – 1 Вт. Использование трех частотных поддиапазонов с общей шириной 300 МГц делает стандарт IEEE 802.11a самым широкополосным из семейства стандартов IEEE 802.11 и позволяет разбить весь частотный диапазон на 12 каналов, каждый из которых имеет ширину 20 МГц, причем восемь из них лежат в 200-мегагерцевом диапазоне от 5,15 до 5,35 ГГц, а остальные четыре канала расположены в 100-мегагерцевом диапазоне от 5,725 до 5,825 ГГц (рис. 3).

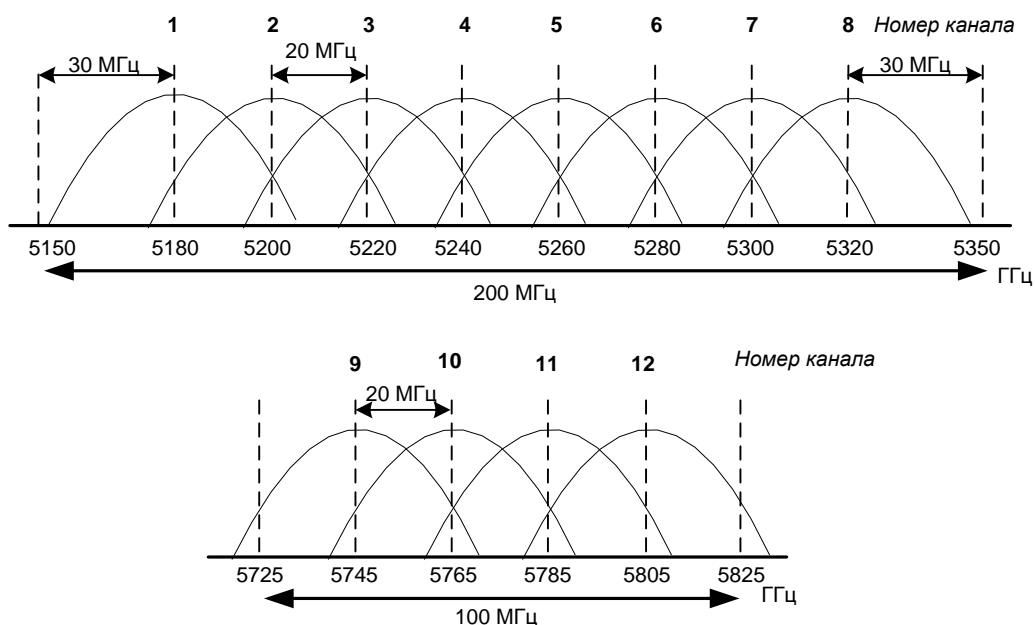


Рис. 3. Порядок использования частотных каналов в диапазоне 5 ГГц (IEEE 802.11a)

Спектральная маска передаваемого сигнала в стандарте IEEE 802.11a представлена на рис. 4.

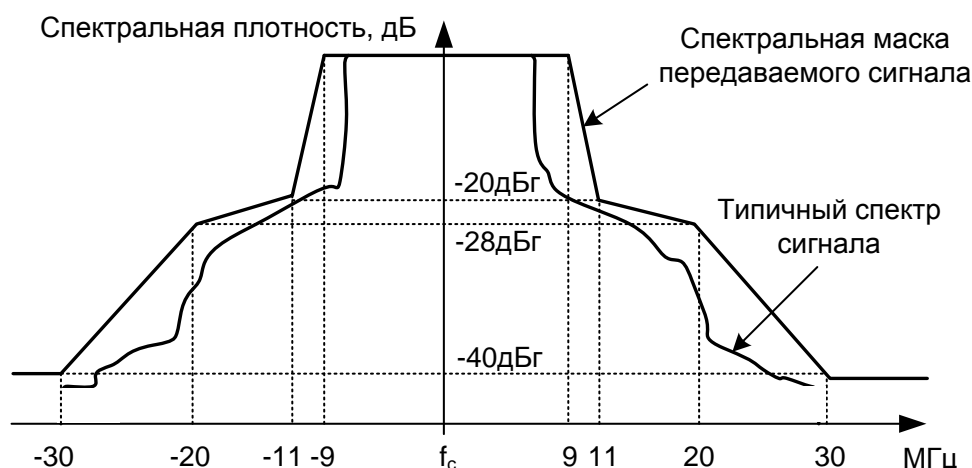


Рис. 4. Спектральная маска передаваемого сигнала IEEE 802.11a

Наличие нескольких перекрывающихся каналов как в стандартах IEEE 802.11b/g, так и в стандарте IEEE 802.11a, и определило появление нового класса беспроводных сетей – многоканальных mesh-сетей, станции которых оснащены несколькими радиоинтерфейсами и могут работать одновременно на нескольких каналах. Это способствует более полному использованию преимуществ частотного планирования в mesh-сетях стандарта IEEE 802.11 путем сокращения числа станций, работающих в создаваемом домене коллизий на одном и том же частотном канале. Однако возникает самостоятельная задача, состоящая в оптимизации процесса распределения (выделения, закрепления) каналов за радиоинтерфейсами mesh-станций. Для решения этой задачи в настоящее время уже известен ряд алгоритмов.

II. Анализ известных решений

Как показал проведенный анализ [5–8], к сожалению, большинство способов (именуемых также методами или алгоритмами) распределения ЧК в многоканальных mesh-сетях основаны больше на эвристических схемах, чем на теоретически обоснованных решениях. Анализ недостатков таких достаточно распространенных алгоритмов как Hyacinth (С-Hyacinth или D-Hyacinth) и CoMTaC позволили определить следующие требования к перспективным решениям в этой области:

- обеспечение согласованного решения задач выделения радиоинтерфейсов на mesh-станциях и закрепление за ними неперекрывающихся каналов;
- учет технологических особенностей сети, которые определяют дальность связи, интенсивность поступления в сеть абонентского трафика, количество используемых неперекрывающихся каналов и т.п.;
- предотвращение возникновения эффекта «скрытой станции»;
- учет территориальной удаленности mesh-станций, их активности, мощности, количества поддерживаемых mesh-станцией радиоинтерфейсов т.д.

III. Математическая модель структурной самоорганизации mesh-сети стандарта IEEE 802.11

В соответствии со сформулированными требованиями системного характера предлагается математическая модель структурной самоорганизации mesh-сети стандарта IEEE 802.11. В рамках предлагаемой модели предполагаются известными следующие данные: $\{R_i, i = \overline{1, N}\}$ – множество mesh-станций, где N – общее их количество в сети; m_j – число радиointерфейсов на mesh-станции R_j ; K – количество неперекрывающихся каналов, используемых в mesh-сети. Так, например, в технологии IEEE 802.11b/g таких каналов 3÷4 (рис. 1), а в технологии IEEE 802.11a – 12 неперекрывающихся каналов (рис. 3). Кроме того, пусть $\{G_z, z = \overline{1, Z}\}$ – множество зон устойчивого приема – кластеров (Transmission Range, TR), которые образуют территориально удаленные mesh-станции, где Z – их общее количество в сети. Причем в рамках данной статьи условимся, что зону устойчивого приема образует 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.

С целью учета территориальной удаленности mesh-станций в сети в математическую модель введено понятие матрицы зон устойчивого приема или TR-матрицы. Матрица является прямоугольной с количеством строк, соответствующим количеству зон устойчивого приема (Z), и с количеством столбцов, соответствующим общему количеству mesh-станций (N) в сети, т.е.

$$D = \|d_{i,j}\|, \quad i = \overline{1, Z}; \quad j = \overline{1, N},$$

где $d_{i,j} = \begin{cases} 1, & \text{если } j\text{-я станция находится в } i\text{-й TR;} \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases}$

В рамках предлагаемой модели в ходе решения задачи распределения каналов по РИ mesh-станций сети необходимо обеспечить расчет булевой переменной

$$x_{i,j}^k \in \{0,1\} \quad (i = \overline{1, N}; \quad j = \overline{1, m_i}; \quad k = \overline{1, K}), \quad (1)$$

причем $x_{i,j}^k = \begin{cases} 1, & \text{если } j\text{-й РИ } i\text{-й станции работает на } k\text{-м ЧК;} \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$

Общее количество переменных (1), которые определяют порядок распределения каналов, зависит от количества станций в сети, радиointерфейсов, используемых каналов и, соответственно, будет определяться выражением $N \times m \times K$. Результатом расчета переменных (1) должно быть разбиение mesh-сети в целом и каждой зоны устойчивого приема в отдельности на связные между собой домены коллизий, в которых mesh-станции функционируют на одном и том же канале. В связи с этим при расчете искомым переменных $x_{i,j}^k$ в каждой отдельно взятой G_z необходимо выполнить ряд важных условий-ограничений [3, 4]:

1. Условие включения i -й станции в сеть:

$$\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{m_i} x_{i,j}^k \geq m^* \quad (i = \overline{1, N}), \quad (2)$$

где $1 \leq m^* \leq m_i$ – целочисленный параметр, характеризующий минимально необходимое число включенных РИ на произвольно выбранной mesh-станции; $\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{m_i} x_{i,j}^k$ – количество включенных РИ на одной станции. Как правило, количество поддерживаемых радиointерфейсов на станции равно $2 \div 3$ [5, 6].

2. Условие выделения j -му радиointерфейсу i -й mesh-станции не более одного канала (рис. 5):

$$\sum_{k=1}^K x_{i,j}^k \leq 1 \quad (i = \overline{1, N}; j = \overline{1, m_i}). \quad (3)$$

Назначение одному РИ одновременно двух каналов



а) условие (3) не выполняется



Назначение одному РИ одного канала

б) условие (3) выполняется

Рис. 5. Пример проверки условия выделения радиointерфейсу mesh-станции не более одного канала

3. Условие закрепления k -го канала на i -й mesh-станции не более чем за одним радиointерфейсом (рис. 6):

$$\sum_{j=1}^{m_i} x_{i,j}^k \leq 1 \quad (i = \overline{1, N}; k = \overline{1, K}). \quad (4)$$

Назначение разным радиointерфейсам одного и того же канала



а) условие (4) не выполняется



Назначение различным радиointерфейсам разных каналов

б) условие (4) выполняется

Рис. 6. Пример проверки условия закрепления одного канала на mesh-станции не более чем за одним радиointерфейсом

Условия (3) и (4) носят линейный характер, являются взаимодополняющими и определяют порядок закрепления как каналов за РИ mesh-станции, так и наоборот.

4. Условие работы двух mesh-станций друг с другом не более чем на одном канале (для одной зоны устойчивого приема) (рис. 7):

$$\sum_{k=1}^K \left[\sum_{j=1}^{m_i} x_{i,j}^k \cdot \sum_{l=1}^{m_s} x_{s,l}^k \right] \leq 1, \quad (\text{для } (i, s)\text{-пары станций, } i, s = \overline{1, N}; i \neq s), \quad (5)$$

которое вводится для устранения нежелательной структурной избыточности и носит квадратичный характер.

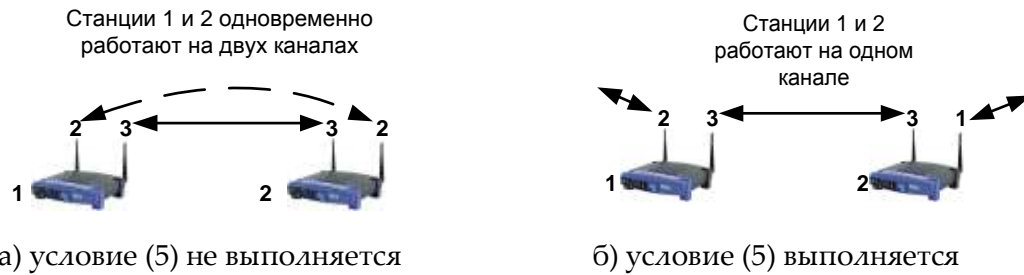


Рис. 7. Пример проверки условия работы двух mesh-станций друг с другом не более чем на одном канале

5. Условие того, что произвольная mesh-станция на включенном на ее радиointерфейсе канале работает хотя бы с одной станцией своей TR (рис. 8):

$$x_{ij}^k \leq \sum_{\substack{u \in G_z, r=1 \\ u \neq i}}^{m_r} x_{ur}^k \quad (i \in G_z, z = \overline{1, Z}, j = \overline{1, m_i}, k = \overline{1, K}), \quad (6)$$

где $\sum_{u \in G_z} \sum_{r=1}^{m_r} x_{ur}^k$ – число станций в зоне G_z , которые работают на k -м канале.

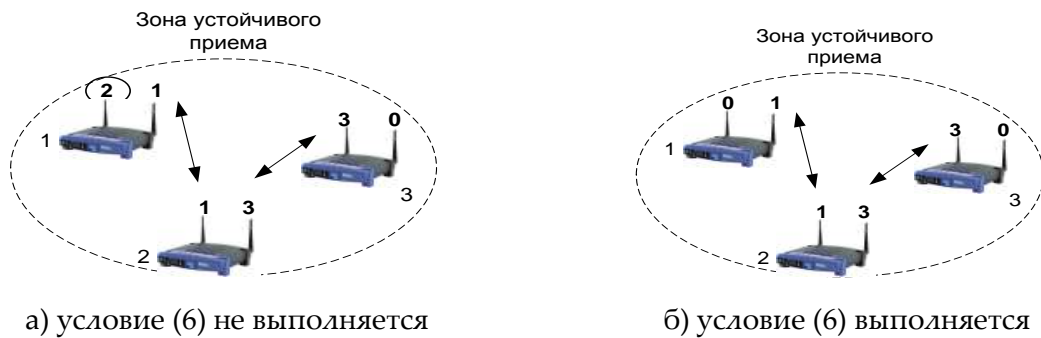


Рис. 8. Пример проверки условия работы произвольной mesh-станции хотя бы с одной станцией своей зоны устойчивого приема

6. Условие отсутствия эффекта «скрытой станции», то есть станция, которая принадлежит одновременно к нескольким зонам устойчивого приема, не должна работать на одном и том же канале со станциями различных TR (рис. 9):

$$\sum_{j=1}^{m_j} x_{sj}^k \sum_{i \in G_p} \sum_{r=1}^{m_r} x_{ir}^k = \sum_{j=1}^{m_j} x_{sj}^k \sum_{i \in G_*^s} \sum_{r=1}^{m_r} x_{ir}^k \quad (s = \overline{1, N}, k = \overline{1, K}, G_p \in G_*^s), \quad (7)$$

где G_*^s – множество зон устойчивого приема, к которым принадлежит s -я станция.

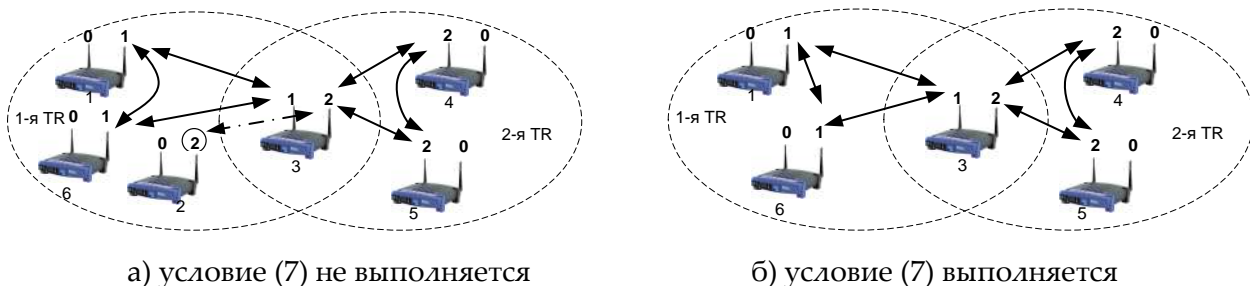


Рис. 9. Пример проверки эффекта «скрытой станции»

7. Условие связности сети (связности создаваемых доменов коллизий mesh-станций):

$$p = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{m_i} \sum_{k=1}^K x_{i,j}^k \geq N + K - 1, \quad (8)$$

выполнение которого совместно с (5) в условиях дефицита каналов ($K \leq N - 1$) гарантирует то, что число включенных радиointерфейсов (p) с учетом числа mesh-станций и поддерживаемых в технологии беспроводной связи каналов обеспечит связность многоканальной mesh-сети (рис. 10).



Рис. 10. Пример проверки условия связности сети

Два домена mesh-сети связны, если существует mesh-станция, работающая одновременно на каналах этих двух доменов, т.е. первый РИ станции работает на одном канале, а второй ее РИ работает на другом канале. Две mesh-станции связны, если они находятся в одном домене коллизий, т.е. работают на одном канале.

Целесообразно, чтобы в процессе структурной самоорганизации сети mesh-станции были распределены по создаваемым доменам коллизий равномерно, т.е. сбалансировано. Ведь производительность в создаваемом домене прямо пропорциональна числу входящих в него станций. С этой целью введем условие балансировки числа mesh-станций по доменам коллизий беспроводной ТКС.

8. Условие балансировки числа mesh-станций по доменам коллизий в зависимости от территориальной удаленности, активности станций и количества зон устойчивого приема будет иметь несколько интерпретаций.

8.1. Если все станции находятся в одной TR, условие балансировки числа mesh-станций по доменам коллизий будет иметь следующий вид:

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{m_i} x_{i,j}^k \leq \alpha \quad (k = \overline{1, K}), \quad (9)$$

где $\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{m_i} x_{i,j}^k$ – число mesh-станций в сети, работающих на k -м канале; α – верхний динамически управляемый порог числа mesh-станций в произвольно выбранном домене коллизий в многоканальной mesh-сети.

8.2. При учете территориальной удаленности станций, т.е. при нахождении станций в разных зонах устойчивого приема, условие балансировки будет иметь следующий вид:

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

где в левой части неравенства представлено число mesh-станций в z -й TR.

8.3. Важным фактором при балансировке числа mesh-станций по доменам коллизий является их активность, под которой в данном случае будем понимать условный коэффициент, зависящий от частоты выхода станции в радиоэфир, длительности сеансов связи и интенсивности передаваемого трафика. В связи с этим условие балансировки mesh-станций по доменам коллизий сети может принять следующую форму:

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

где β_i – коэффициент активности i -й станции, который зависит от количества подключенных пользователей, интенсивности входящего и исходящего трафика, типа трафика.

8.4. В связи с неравномерной загрузкой РИ mesh-станции и ввиду работы их по различным направлениям для получения более точной формализации условия (11) рекомендуется также использовать нормированный коэффициент активности mesh-станций $\beta_i / \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{m_i} x_{i,j}^k$, тогда условие балансировки примет вид

$$\sum_{i=1}^N d_{z,i} \cdot \frac{\beta_i}{\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{m_i} x_{i,j}^k} \sum_{j=1}^{m_i} x_{i,j}^k \leq \alpha \quad (\text{для каждой } (z,k)\text{-пары, } z = \overline{1, Z}, k = \overline{1, K}). \quad (12)$$

Расчет искомых переменных (1) и параметра α в соответствии с условиями, формализованными неравенствами (2)-(12), целесообразно осуществить в ходе решения оптимизационной задачи, обеспечивая минимум или максимум предварительно выбранного критерия качества решения задачи структурной самоорганизации. К основным требованиям к критерию оптимальности стоит отнести, с одной стороны, соответствие физике решаемой задачи, т.е. задачи распределения каналов в mesh-сети, а с другой, возможности получения на его основе практически реализуемых решений (результатов) [7]. Таким образом, постановка самой задачи не должна быть излишне усложнена, а для ее решения должен быть известен или разработан эффективный метод.

В связи с тем, что количество станций в mesh-сетях значительно преобладает над числом неперекрывающихся каналов, и существует необходимость решения таких проблем как интерференция и эффект «скрытой» станции, в качестве подобного критерия был выбран минимум числа работающих mesh-станций в создаваемых доменах коллизий, что, как известно [8], способствует повышению общей производительности многоканальной mesh-сети. Тогда в рамках предложенной математиче-

ской модели задача структурной самоорганизации с точки зрения распределения каналов в mesh-сети приобретает вид оптимизационной, в ходе решения которой необходимо обеспечить выполнение следующего критерия

$$\min_{x, \alpha} \alpha \quad (13)$$

при учете условий-ограничений (1)-(12).

Сформулированная задача с точки зрения физики процессов, протекающих в многоканальных mesh-сетях, относится к классу задач балансировки сетевых ресурсов – взвешенного числа mesh-станций в доменах коллизий относительно их территориальной удаленности и активности, а с математической точки зрения – это задача смешанного целочисленного нелинейного программирования – MINLP (Mixed-Integer NonLinear Programming) [9]. В модели искомые переменные $x_{i,j}^k$ (1) являются булевыми, минимизируемая переменная α является или целочисленной (при условиях (7)-(10)), или действительной (при условиях (11)-(12)), а ограничения на искомые переменные носят как линейный (1)-(4), (6)-(11), так и нелинейный (5), (12) характер.

Для решения задач данного класса известен ряд эффективных методов решения – округления (Rounding-off), ветвей и границ (Branch-and-bound), последовательной линеаризации (SLP), штрафных функций (Penalty function), множителей Лагранжа (Lagrangian relaxation), имитации отжига (Simulated annealing), а также генетический алгоритм (Genetic algorithm) и различные смешанные (гибридные) методы [9-11].

IV. Пример решения задачи распределения каналов в многоканальной mesh-сети стандарта IEEE 802.11

С целью оценки качества структурной самоорганизации при распределении каналов в рамках предложенной модели рассмотрим пример решения поставленной задачи. В примере рассматривалась mesh-сеть, состоящая из 26 станций, объединенных в три зоны устойчивого приема (табл. 1).

Табл. 1. Принадлежность mesh-станции к зоне устойчивого приема

Зоны устойчивого приема, TR	Номера mesh-станций
TR №1	№1, №2, №3, №4, №5, №6, №7, №8
TR №2	№7, №8, №9, №10, №11, №12, №13, №14, №15, №16, №17
TR №3	№16, №17, №18, №19, №20, №21, №22, №23, №24, №25

При этом на каждой станции количество радиointерфейсов было равно двум. Число неперекрывающихся каналов, для примера, составляло 4. Результат решения задачи структурной самоорганизации с указанием исходных зон устойчивого приема, результирующих доменов коллизий и порядка распределения каналов по радиointерфейсам mesh-станций приведен на рис. 11.

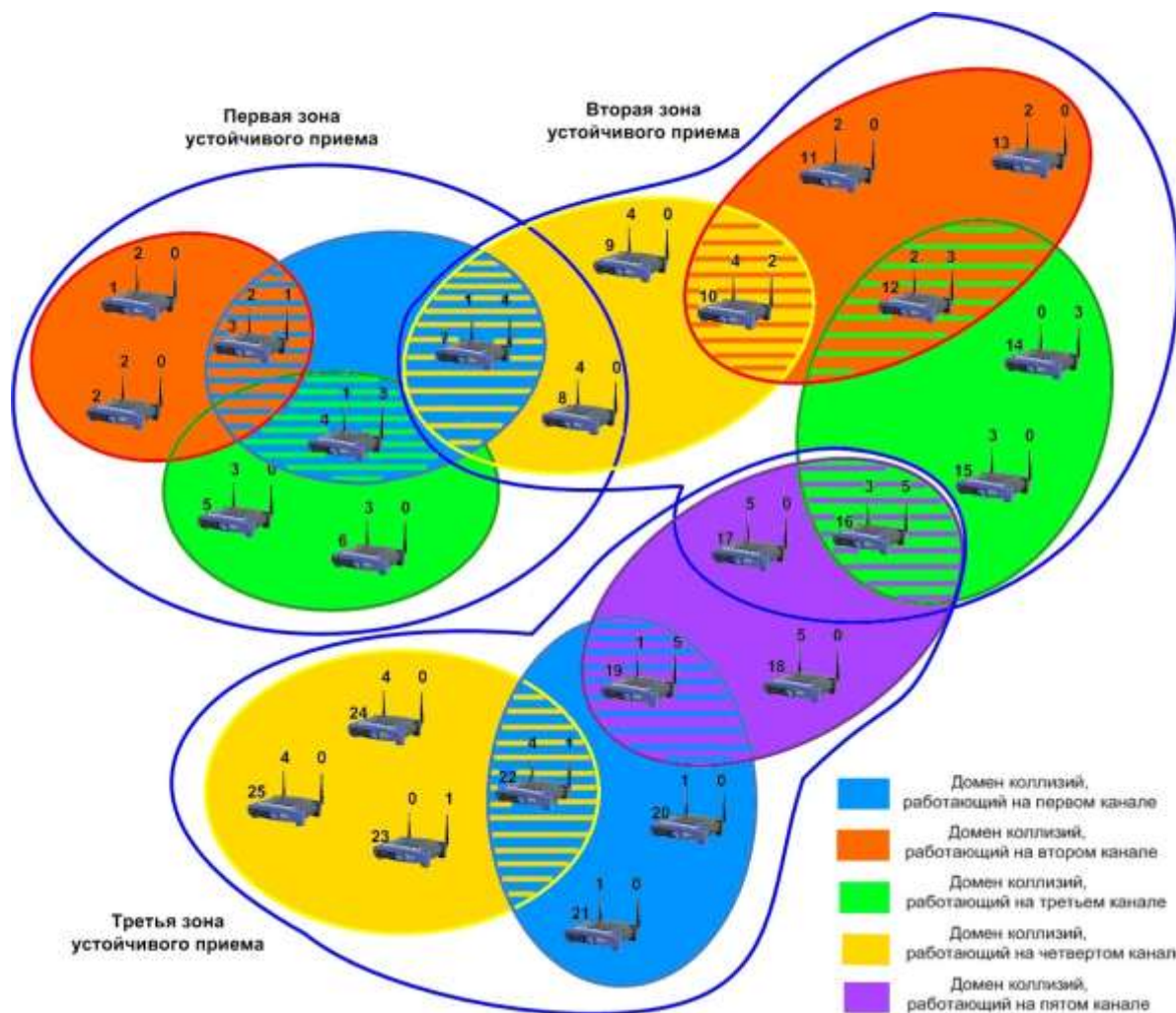


Рис. 11. Пример разбиения зон устойчивого приема на домены коллизий в ходе решения задачи структурной самоорганизации при распределении каналов в многоканальной mesh-сети

Все mesh-станции в каждой зоне устойчивого приема распределены по связным доменам коллизий, в рамках которых используется один частотный канал (табл. 2). В ходе решения установлено, что каждая зона устойчивого приема разбивалась не больше чем на K доменов коллизий, где, напомним, K – количество неперекрывающихся каналов. При этом количество таких доменов снижалось на численность зон устойчивого приема, которые были связаны с рассматриваемой TR.

Выводы

Установлено, что одной из основных задач в многоканальных mesh-сетях является задача распределения каналов между радиointерфейсами mesh-станций. В связи с этим проанализированы существующие методы распределения каналов в многоканальных mesh-сетях. На основе недостатков проанализированных методов распределения каналов в многоканальных mesh-сетях были сформулированы требования системного характера, направленные на устранение выявленных недостатков, и под-

разумевающие разработку математической модели распределения каналов в многоканальных mesh-сетях.

Табл. 2. Распределение mesh-станций по доменам коллизий в зонах устойчивого приема

Зоны устойчивого приема, TR	Номер домена коллизий / номер используемого ЧК	Номер mesh-станции
TR №1	№1 / №2	№1, №2, №3
	№2 / №1	№3, №4, №7
	№3 / №3	№4, №5, №6
	№4 / №4	№7, №8, №9, №10
TR №2	№5 / №2	№10, №11, №12, №13
	№6 / №3	№12, №14, №15, №16
	№7 / №5	№16, №17, №18, №19
TR №3	№8 / №1	№19, №20, №21, №22
	№9 / №4	№22, №23, №24, №25

На основании сформулированных требований, выдвигаемых к перспективным решениям в области распределения каналов в многоканальных mesh-сетях, предложена математическая модель, представленная рядом линейных и нелинейных условий-ограничений. Новизна модели состоит в формулировке задачи распределения каналов как задачи балансировки числа mesh-станций по создаваемым доменам коллизий, взвешенного относительно их активности и территориальной удаленности, что позволило повысить производительность mesh-сети в целом. Рост производительности сети также обуславливался гарантией отсутствия эффекта «скрытой станции», что достигалось благодаря специально введенным в структуру модели условиям (7). Кроме того, в ходе распределения каналов гарантируется связная структура mesh-сети, которая обеспечивалась за счет работы mesh-станций, находящихся в разных зонах устойчивого приема, одновременно на нескольких частотных каналах.

Отмечено, что сформулированная задача по распределению каналов в многоканальных mesh-сетях с точки зрения физики процессов, протекающих в многоканальной сети, относится к классу задач балансировки сетевых ресурсов – числа mesh-станций в доменах коллизий, а с математической точки зрения – это задача смешанного целочисленного нелинейного программирования. В качестве инструментальных средств при решении сформулированной в работе оптимизационной задачи была использована система MatLab v.7.x, в рамках которой действовала программа fminconset пакета Optimization Toolbox.

Список литературы:

1. Рошан П. Лиэри Д. Основы построения беспроводных локальных сетей стандарта 802.11: Пер. с англ. – М.: Издат. дом «Вильямс», 2004. – 304 с.

2. Широкополосные беспроводные сети передачи информации / В.М. Вишневецкий, А.И. Ляхов, С.А. Портной, И.В. Шахнович. – М: Техносфера, 2005. – 592 с.
3. *Akyildiz I. F.* Wireless mesh networks: a survey // *Computer Networks* – Vol. 47. – 2005. – P. 445-487.
4. *Raniwala A.* Centralized channel assignment and routing algorithms for multi-channel wireless mesh networks // *ACM Mobile Computing and Communications Review*. – 2004. – Vol. 8. – P. 50–65.
5. *Гоголева М.А.* Обзор и классификация методов распределения частотных каналов в многоканальных mesh-сетях // *Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб.* – 2009. – Вып. 159. – С. 117–121.
6. *Лемешко А.В., Гоголева М.А.* Трехиндексная математическая модель распределения частотных каналов в многоканальных mesh-сетях // *Моделювання та інформаційні технології. Збірник наукових праць*. Вип. 54. – К.: Інститут проблем моделювання в енергетиці Національної АН України. – 2009. – С. 94–103.
7. *Лемешко А.В., Гоголева М.А.* Модель распределения частотных каналов с учетом территориальной удаленности станций в многоканальных mesh-сетях // *Збірник наукових праць Харківського університету повітряних сил*. – Х.: ХУ ПС, 2009. – Вип. 4(22). – С. 38–41.
8. *Raniwala A.* Architecture and algorithms for an IEEE 802.11-based multi-channel wireless mesh network // *Proc. of INFOCOM '05* – Vol. 3. – 2005. – P. 2223–2234.
9. *Костевич Л.С.* Математическое программирование: Информ. технологии оптимальных решений: Учеб. пособие. – Мн.: Новое знание, 2003. – 150 с.