

ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГИПЕРГРАФОВ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ МНОГОКАНАЛЬНЫХ MESH-СЕТЕЙ СТАНДАРТА IEEE 802.11

Введение

Постоянная модернизация протоколов, проводимая в семействе стандартов IEEE 802.11, направлена на повышение производительности беспроводных локальных сетей доступа (Wireless Local Access Networks, WLAN). При этом ведутся активные действия по разработке и внедрению нового стандарта IEEE 802.11ac для построения WLAN. Существенный прирост производительности сетей IEEE 802.11ac достигается за счет использования более широких каналов, повышения эффективности модуляции (способа передачи битов данных с помощью радиочастотных волн) и многопользовательских соединений (Multi-User MIMO).

Наряду с внедрением новых стандартов в технологию WLAN повышения производительности можно добиться использованием многошаговых (multi-hop) беспроводных mesh-сетей (Wireless Mesh Networks, WMN) стандарта IEEE 802.11. 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].

Как показал проведенный в работе [4] анализ, качество решения задачи распределения частотных каналов в MR-MC WMN стандарта IEEE 802.11 во многом определяется технологическими и территориальными характеристиками беспроводной mesh-сети. К технологическим характеристикам следует отнести количество используемых неперекрывающихся ЧК, а также число радиointерфейсов, используемых на каждой отдельной станции. В качестве территориальных характеристик могут выступать стационарный размер, степень перекрытия и неоднородность зон устойчивого приема (Transmission Range, TR). Кроме того, при решении задачи распределения ЧК должен выполняться ряд требований к синтезируемой mesh-сети. К основным таким требованиям следует отнести связность беспроводной mesh-сети, а также отсутствие эффекта «скрытой станции» [1 – 4]. Основной особенностью подходов к решению задачи распределения ЧК в MR-MC WMN стандарта IEEE 802.11, предложенных в [1 – 4], является то, что все они были получены эмпирически. С целью теоретического обоснования задачи распределения ЧК должен быть использован эффективный математический аппарат, позволяющий произвести описание MR-MC WMN как на этапе постановки задачи, так и при анализе результатов ее решения.

Необходимо заметить, что традиционные подходы к синтезу структурных моделей ТКС базируются на использовании математического аппарата теории графов [5]. Использование теории графов обеспечивает максимальную наглядность при моделировании MR-MC WMN, так как множеству станций ставится в однозначное соответствие множество вершин графа, а множеству радиоканалов – множество ребер (дуг) графа. Однако графовое представление MR-MC WMN при свойственной ей простоте и наглядности произвольно «уравнивает» основные элементы моделируемой системы. Так, например, все станции mesh-сети относятся к одному и тому же множеству вершин, хотя в действительности роль и место той или иной станции в mesh-сети индивидуальны и определяются числом инцидентных к ней радиоканалов (дуг, ребер) графа, количество поддерживаемых радиointерфейсов, используемой технологией беспроводной связи и т.д.

Таким образом, при моделировании MR-MC WMN необходимо использовать более эффективные, хотя, возможно, и более сложные, способы представления mesh-сети с использованием топологических идей [6, 7]. В качестве таких подходов может быть использован математический аппарат теории гиперграфов [8 – 10], позволяющий произвести теоретическое описание задачи распределения ЧК в MR-MC WMN с учетом стационарного размера,

степени перекрытия и неоднородности зон устойчивого приема на этапе постановки задачи, а также анализа стационарных размеров создаваемых доменов коллизий и их связности на этапе анализа результатов решения.

Гиперграфовое представление многоканальных mesh-сетей

На этапе постановки задачи распределения ЧК в MR-МС WMN каждой отдельной взятой станции ставится в соответствие вершина $n_i \in N$ гиперграфа H . По аналогии, каждой отдельно взятой зоне устойчивого приема ставится в соответствие ребро $z_j \in Z$ гиперграфа H . Тогда предикат R , являясь инцидентором гиперграфа H , определяет принадлежит ли i -я станция j -й зоне устойчивого приема. Так, в случае если i -я mesh-станция участвует в формировании j -й зоны устойчивого приема, то предикат $R(n_i, z_j)$ – истинный, т.е. равный единице, в противном случае $R(n_i, z_j)$ – ложный, т.е. равный нулю. В результате этого описание MR-МС WMN может быть произведено с использованием конечного гиперграфа $H = (N, Z; R)$, состоящего из пары множеств вершин $N = \{n_i / i \in I\}$ и ребер $Z = \{z_j / j \in J\}$ вместе с двуместным предикатом $R \Leftrightarrow R(n_i, z_j)$, определенным для всех $n_i \in N$ и $z_j \in Z$. Исходя из этого, принадлежность i -й станции j -й зоне устойчивого приема определяется инцидентностью i -й вершины j -му ребру в гиперграфе H [8 - 10].

В рамках гиперграфового описания удастся однозначно формализовать правила формирования матрицы зон устойчивого приема (TR-матрицы), введенной в работах [1 - 4], с помощью матрицы инцидентностей гиперграфа H

$$A(H) \doteq \|a_{z_j, n_i}\|, \quad (1)$$

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

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

В работах [1 - 4] решением задачи распределения ЧК является расчет булевой переменной x_{n_i, k_t} , характеризующей закрепление частотного канала $k_t \in K$ за mesh-станцией $n_i \in N$, где K – множество неперекрывающихся частотных каналов (табл. 1).

$$x_{n_i, k_t} = \begin{cases} 1, & \text{если } i\text{-й станции выделен } t\text{-й неперекрывающийся ЧК}; \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (2)$$

Таблица 1

Количество неперекрывающихся ЧК
для различных стандартов беспроводных сетей

Стандарт	Количество неперекрывающихся частотных каналов
IEEE 802.11a/n	12
IEEE 802.11b/g/n	3 или 4
IEEE 802.11ac	25

В результате решения задачи распределения ЧК производится закрепление t -го частотного канала за i -й станцией, принадлежащей j -й зоне устойчивого приема. Таким образом, предикат $P(n_i, k_t, z_j)$ может быть рассчитан из выражения

$$P(n_i, k_t, z_j) = x_{n_i, k_t} R(n_i, z_j). \quad (3)$$

Необходимо заметить, что в результате решения задачи распределения ЧК производится формирование доменов коллизий станциями одной TR, использующими общий частотный канал. Поэтому каждой отдельно взятой станции $n_i \in N$ будет поставлена в соответствие вершина, а каждому домену коллизий $d_u \in D$ ребро гиперграфа $G(N, D; Q)$. В результате этого использование i -й станции при формировании u -го домена коллизий определяется предикатом $Q(n_i, d_u)$. Предикат $Q(n_i, d_u)$ однозначно определяется соответствием

$$Q(n_i, d_u) \Leftrightarrow P(n_i, k_t, z_j). \quad (4)$$

Таким образом, в случае если i -й mesh-станции, входящей в состав j -й зоны устойчивого приема выделен t -й неперекрывающийся частотный канал ($P(n_i, k_t, z_j)=1$), то станция участвует в формировании u -го домена коллизий и предикат $Q(n_i, d_u)=1$. В противном случае если i -я mesh-станция не входит в состав j -й зоны устойчивого приема или ей не выделен t -й неперекрывающийся частотный канал ($P(n_i, k_t, z_j)=0$), то предикат $Q(n_i, d_u)=0$. Предикат $Q(n_i, d_u)$ отображает участвует ли i -я станция в формировании домена коллизий $d_u \in D$ или нет.

В качестве примера рассмотрим MR-МС WMN, представленную на рис. 1, состоящую из восьми станций, которые объединены в три зоны устойчивого приема. Указанной mesh-сети соответствует гиперграф $H = (N, Z; R)$, изображенный на рис. 2, с множеством вершин $N = \{n_1, n_2, \dots, n_8\}$, множеством ребер $Z = \{z_1, z_2, z_3\}$ и предикатом R , определяющим принадлежность той или иной станции к произвольной зоне устойчивого приема. Для приведенного примера предикаты $R(n_1, z_1)$, $R(n_2, z_1)$, $R(n_3, z_1)$, $R(n_3, z_2)$, $R(n_4, z_1)$, $R(n_4, z_2)$, $R(n_4, z_3)$, $R(n_5, z_2)$, $R(n_6, z_1)$, $R(n_6, z_3)$, $R(n_7, z_3)$, $R(n_8, z_3)$ являются истинными, т.е. $a_{z_j, n_i} = 1$, а в остальных случаях предикаты являются ложными, т.е. $a_{z_j, n_i} = 0$.

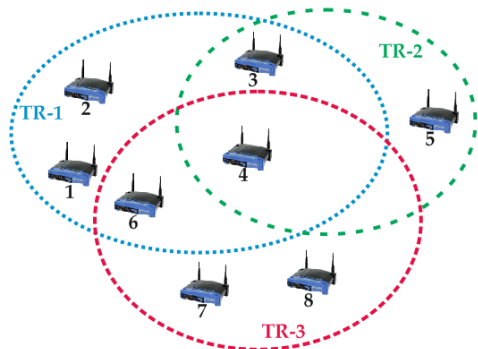


Рис. 1. Возможная конфигурация mesh-сети

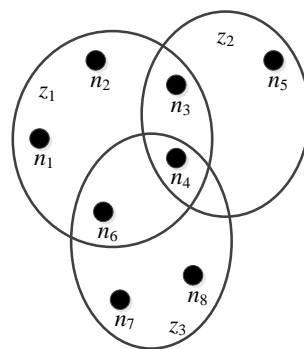


Рис. 2. Гиперграфовое представление mesh-сети

Mesh-сеть, представленная на рис. 1, может быть описана матрицей инцидентий (TR-матрицей):

$$A(H) = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{vmatrix}.$$

В результате решения задачи распределения трех неперекрывающихся ЧК ($K = \{k_1, k_2, k_3\}$) с использованием модели, выполняющей балансировку количества станций по создаваемым доменам коллизий [1 – 4], была получена mesh-сеть, представленная на рис. 3. Mesh-сети, представленной на рис. 3 соответствует гиперграф $G = (N, D; Q)$, изображенный

на рис. 4, с множеством вершин $N = \{n_1, n_2, \dots, n_8\}$, множеством доменов коллизий $D = \{d_1, d_2, d_3, d_4\}$ и предикатом $Q(n_i, d_u)$.

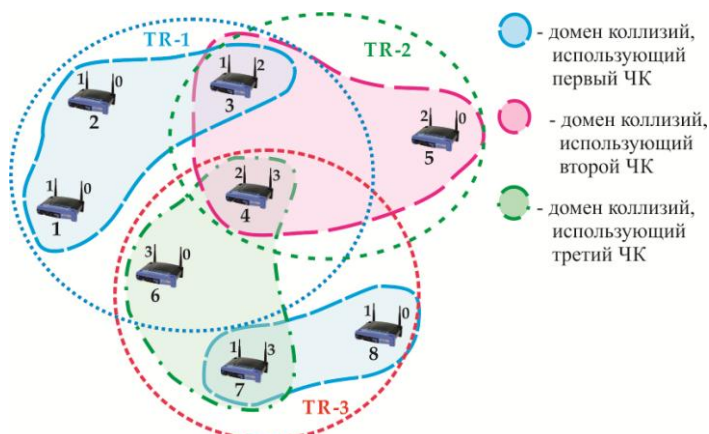


Рис. 3. Пример решения задачи распределения трех неперекрывающихся ЧК

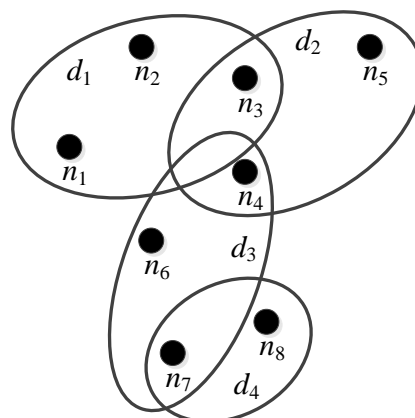


Рис. 4. Гиперграфовое представление решения задачи распределения ЧК

Приведенный подход позволил определить базовую модель описания беспроводной многоканальной mesh-сети с использованием математического аппарата теории гиперграфов. Подобное представление позволит в дальнейшем использовать математический аппарат гиперграфов для анализа структурных и функциональных характеристик mesh-сетей, как на этапе постановки задачи распределения ЧК, так и для анализа результатов.

Использование математического аппарата гиперграфов для анализа характеристик mesh-сети

Как было указано во введении, качество решения задачи распределения частотных каналов MR-МС WMN стандарта IEEE 802.11 во многом определяется технологическими и территориальными характеристиками беспроводной mesh-сети [4]. При этом технологические характеристики, являясь количественными показателями, дают достаточное описание mesh-сети на этапе постановки задачи распределения ЧК. Однако территориальные характеристики, ввиду отсутствия эффективного математического аппарата, не имеют явно выраженных количественных значений, в результате чего результаты решения задачи распределения ЧК описываются лишь качественными показателями.

Как показал проведенный в работе [4] анализ, уменьшение количества станций, входящих в состав каждой зоны устойчивого приема (станционного размера зоны устойчивого приема), приводит к повышению производительности mesh-сети в результате решения задачи распределения ЧК. Станционный размер зоны устойчивого приема mesh-сети, с использованием математического аппарата теории гиперграфов, можно оценить путем определения множества вершин, инцидентных каждому ребру $z_j \in Z$ [8 – 10]:

$$N(z_j) \doteq N_H(z_j) \doteq \{n_i \in N / R(n_i, z_j)\}. \quad (5)$$

Выражение (5) также может быть использовано для анализа результатов решения задачи распределения ЧК. Так для определения числа станций, входящих в состав того или иного домена коллизий, выражение (5) должно быть преобразовано к виду

$$N(d_u) \doteq N_H(d_u) \doteq \{n_i \in N / Q(n_i, d_u)\}. \quad (6)$$

Ввиду использования многоинтерфейсного режима работы, в результате анализа проведенного в [4] установлено, что увеличение количества радиointерфейсов на каждой станции сети, с одной стороны, способствует повышению производительности mesh-сети при решении задачи распределения ЧК, а с другой стороны, увеличивает сложность и стоимость ре-

лизации стационарного оборудования. Поэтому количество радиointерфейсов на каждой станции должно определяться ее местом в сети. Так как каждая станция mesh-сети может одновременно входить в состав нескольких зон устойчивого приема, то каждой вершине $n_i \in N$ гиперграфа H можно отнести множество всех инцидентных ей ребер представленного в виде

$$Z(n_i) \doteq Z_H(n_i) \doteq \{z_j \in Z / R(n_i, z_j)\}. \quad (7)$$

Аналогично выражению (5), выражение (7) может быть использовано при анализе результатов решения задачи распределения частотных каналов. Так, для определения числа доменов коллизий, в которых участвует i -я станция, необходимо воспользоваться выражением

$$D(n_i) \doteq D_H(n_i) \doteq \{d_u \in D / Q(n_i, d_u)\}. \quad (8)$$

Таким образом, мощности множеств $|Z(n_i)|$ и $|N(z_j)|$ из теории гиперграфов определяют соответственно степень i -й вершины и степень j -го ребра в гиперграфе H , а $|D(n_i)|$ и $|N(d_u)|$ – степень i -й вершины и степень u -го ребра в гиперграфе G [8-10].

В качестве примера рассмотрим mesh-сеть, представленную на рис. 1, а также ее гиперграфовое представление (рис. 2). Станциям в приведенном примере mesh-сети соответствуют следующие степени вершин гиперграфа: $|Z(n_1)| = 1$, $|Z(n_2)| = 1$, $|Z(n_3)| = 2$, $|Z(n_4)| = 3$, $|Z(n_5)| = 1$, $|Z(n_6)| = 2$, $|Z(n_7)| = 1$, $|Z(n_8)| = 1$. Как видно из приведенного примера, определение степени вершин гиперграфа позволяет определить место той или иной станции в конфигурации всей mesh-сети. Так станции №1, 2, 5, 7, 8 имеют значение степени вершины равное единице, станции №3 и 6 – двум, а станция №4 – трем. Степень вершины определяет количество зон устойчивого приема, в состав которых входит станция, а также определяет важность станции при обеспечении связности mesh-сети.

Что касается определения степеней ребер, то для рассматриваемого примера они принимают следующие значения: $|N(z_1)| = 5$, $|N(z_2)| = 3$ и $|N(z_3)| = 4$. Физический смысл степени ребра для mesh-сети заключается в том, что она отображает число станций формирующих ту или иную зону устойчивого приема. Так, например, зона устойчивого приема №1 (TR-1) формируется пятью mesh-станциями, зона устойчивого приема №2 (TR-2) – тремя mesh-станциями, а зона устойчивого приема №3 (TR-3) – четырьмя mesh-станциями. При этом пару mesh-станций, входящих в состав одной зоны устойчивого приема, по аналогии с вершинами гиперграфа, объединенными одним ребром, будем называть смежными [11].

Результат решения задачи распределения трех неперекрывающихся ЧК для примера возможной конфигурации mesh-сети представлен на рис. 3, гиперграфовое представление которого приведено на рис. 4. В приведенном примере решения задачи распределения ЧК станциям mesh-сети соответствуют следующие степени вершин гиперграфа G : $|D(n_1)| = 1$, $|D(n_2)| = 1$, $|D(n_3)| = 2$, $|D(n_4)| = 2$, $|D(n_5)| = 1$, $|D(n_6)| = 1$, $|D(n_7)| = 2$, $|D(n_8)| = 1$. Станции №1, 2, 5, 6 и 8 имеют значение степени вершины равное единице, в результате чего оборудование указанных станций может поддерживать только одноинтерфейсный режим работы. Для станций №3, 4 и 7 значение степени вершины равно двум. Это свидетельствует о том, что указанные станции обеспечивают связность создаваемых доменов коллизий и всей mesh-сети в целом. Оборудование используемое на данных станциях должно поддерживать многоинтерфейсный многоканальный режим работы и использовать не менее двух радиointерфейсов.

Степень ребра гиперграфа $G(N,D;Q)$ определяет количество станций, работающих на определенном ЧК в рамках зоны устойчивого приема, и используется для определения производительности как каждого отдельного домена коллизий, так и mesh-сети в целом. Для примера решения задачи распределения ЧК (рис. 4) степени ребер принимали значения $|N(d_1)| = 3$, $|N(d_2)| = 3$, $|N(d_3)| = 3$ и $|N(d_4)| = 2$.

Производительность mesh-сети, синтезируемой в результате решения задачи распределения ЧК, зависит также от сбалансированности количества станций, входящих в состав доменов коллизий, друг относительно друга по всей сети. В работе [4] было показано, что балансировка количества станций, формирующих домены коллизий, зависит от неоднородности зон устойчивого приема. В случае использования однородной mesh-сети, у которой стационарные размеры зон устойчивого приема одинаковы, при решении задачи распределения ЧК [1 – 4] будут создаваться домены коллизий, стационарные размеры которых будут сбалансированы друг относительно друга по всей mesh-сети. В противном случае, при использовании неоднородной mesh-сети, максимальный стационарный размер домена коллизий будет определяться зоной устойчивого приема наибольшего стационарного размера, в результате чего производительность mesh-сети на различных участках будет значительно отличаться.

С целью определения неоднородности зон устойчивого приема mesh-сети, представленной с использованием теории гиперграфов, может быть использовано понятие h -однородности. Так если в гиперграфе H степень любого j -го ребра h ($|N(z_j)| = h$), то гиперграф H называется h -однородным (h -униформным) [8 – 10]. Из сказанного следует, что если mesh-сеть может быть представлена в виде h -однородного гиперграфа, то такая mesh-сеть также будет h -однородной, в которой параметр h отображает число станций, входящих в состав каждой зоны устойчивого приема. Mesh-сеть, представленная на рис. 1, не является h -однородной (неоднородная mesh-сеть), так как число станций, входящих в состав различных зон устойчивого приема, отличается.

Одним из основных условий к MR-МС WMN на этапе постановки и этапе анализа результатов решения задачи распределения ЧК в mesh-сети, является обеспечение связности зон устойчивого приема и связности создаваемых доменов коллизий [1 – 4]. Кроме того в работе [4] было показано, что увеличение степени перекрытия (связности) зон устойчивого приема, т.е. количества станций находящихся одновременно в нескольких зонах устойчивого приема, приводит к формированию меньшего количества доменов коллизий и, соответственно, увеличению их стационарных размеров. Увеличение стационарных размеров создаваемых доменов коллизий приводит к снижению производительности mesh-сети в целом [1 – 4].

Для определения степени перекрытия зон устойчивого приема, а также связности mesh-сети может быть использовано понятие маршрута. Под маршрутом из теории гиперграфов понимается упорядоченное множество чередующихся вершин и ребер, инцидентных друг другу [8 – 10]. При этом в отличие от теории гиперграфов, в которой началом и концом маршрута могут быть независимо друг от друга как вершина, так и ребро, в mesh-сети в качестве таких элементов могут выступать только станции (вершины гиперграфа).

При оценке связности mesh-сети множества $N \cup Z$ и $N \cup D$ элементов соответствующих гиперграфов $H = (N,Z;R)$ и $G = (N,D;Q)$ могут разбиваться на части, называемые компонентами. Количество компонент будем обозначать как $\chi(H)$ и $\chi(G)$. В случае когда в гиперграфе присутствует лишь одна компонента, например $\chi(H)=1$, гиперграф называется связным [8 – 10]. В противном случае гиперграф является несвязным. Таким образом, если mesh-сеть представлена в виде связного гиперграфа, то она тоже является связной.

Для оценки степени перекрытия зон устойчивого приема воспользуемся понятием степени связности. Из теории гиперграфов вытекает, что связный гиперграф, сохраняющий это свойство после удаления m вершин, называется $m+1$ -связным [8 – 10]; $m+1$ -связной назы-

вается mesh-сеть, которая сохраняет свойство связности при удалении (выходе из строя, перегрузке и т.д.) любых m станций.

С целью определения связности рассмотрим возможную конфигурацию mesh-сети, представленную на рис. 1, которая является 2-связной, так как возникновение нескольких компонент является результатом удаления станции №4, а также любой из станций №3 или 6. В результате удаления станций №4 и 3 образуются две компоненты, первая из которых состоит из станций №1, 2, 6, 7, 8, а вторая компонента – из станции №5. В случае удаления станций №4 и 6 образуются две компоненты, одна из которых состоит из станций №1, 2, 3, 5, а вторая из станций №7 и 8.

Более глубокого анализа связности mesh-сети можно достичь путем попарного определения степени перекрытия (связности) зон устойчивого приема. Так как в состав двух отдельно взятых зон устойчивого приема, при $J > 2$, входит лишь часть станций mesh-сети, то воспользуемся понятием подгиперграфа.

При этом подгиперграфом, порожденным множеством вершин N' , называется гиперграф $H' = (N', Z'; R')$, где $Z' = \{z_j': z_j' = z_j \cap N' \neq \emptyset, z_j \in Z\}$ [11]. Так как степень перекрытия будет определяться для двух зон устойчивого приема, то подгиперграф может быть представлен в виде $H_{c,v} = (N', Z_{c,v}; R')$, где $c, v \in Z, c \neq v$. По аналогии с определением связности всей mesh-сети любые две зоны устойчивого приема являются $b+1$ -связными, если они сохраняют это свойство в результате удаления b станций.

В качестве примера рассмотрим возможную конфигурацию mesh-сети, представленную на рис. 1. Подгиперграф $H_{1,2} = (N', Z_{1,2}; R')$, где $N' = \{n_1, n_2, n_3, n_4, n_5, n_6\}$, $Z_{1,2} = \{z_1, z_2\}$, образованный зонами устойчивого приема TR-1 и TR-2 является 2-связным, так как образование нескольких (двух) компонент происходит в случае удаления в mesh-сети станций №3 и 4. По аналогии определим степени связности других пар зон устойчивого приема. Так, подгиперграф $H_{1,3} = (N', Z_{1,3}; R')$ является 2-связным, а подгиперграф $H_{2,3} = (N', Z_{2,3}; R')$ – 1-связным.

Анализ результатов решения задачи распределения частотных каналов с использованием теории гиперграфов

В работе был проведен анализ зависимости результатов решения задачи распределения ЧК в MR-MC WMN от исходных данных с использованием примеров возможных конфигураций mesh-сетей представленных на рис. 5 и 7, гиперграфовые представления которых представлены соответственно на рис. 6 и 8.

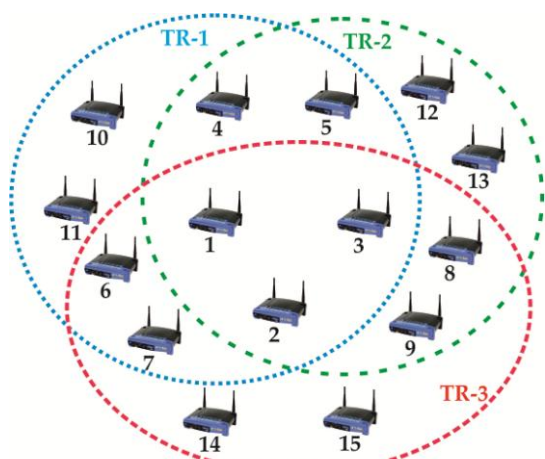


Рис. 5. Возможная конфигурация mesh-сети №2

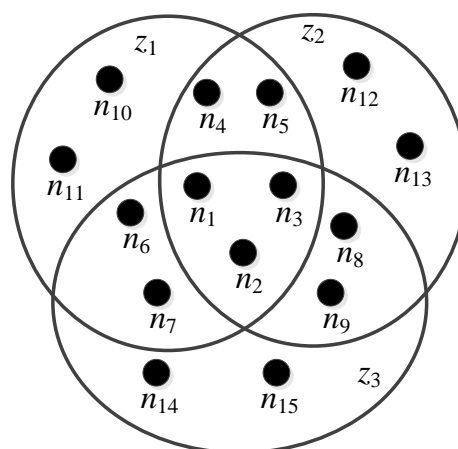


Рис. 6. Гиперграфовое представление mesh-сети №2

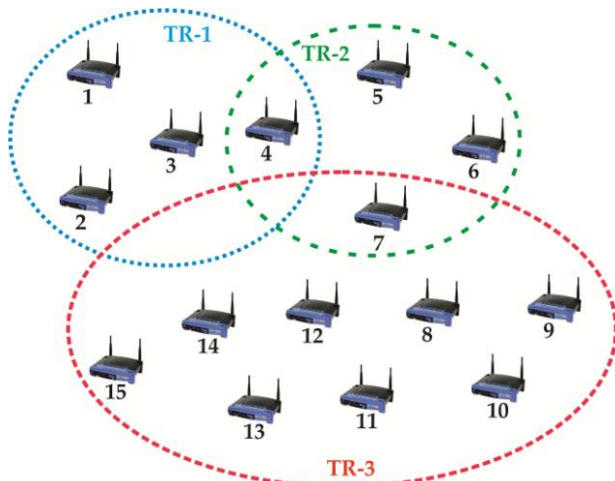


Рис. 7. Возможная конфигурация mesh-сети №3

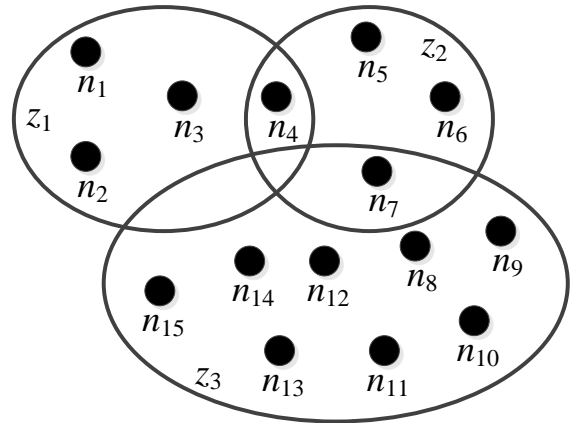


Рис. 8. Гиперграфовое представление mesh-сети №3

На рис. 9 и 11 приведены результаты решения задачи распределения четырех неперекрывающихся ЧК для примеров конфигураций mesh-сетей №2 и 3 соответственно, а на рис. 10 и 12 приведены гиперграфовые представления их структур. Для решения задачи распределения ЧК была использована модель балансировки числа станций по создаваемым доменам коллизий, предложенная в [1 – 4].

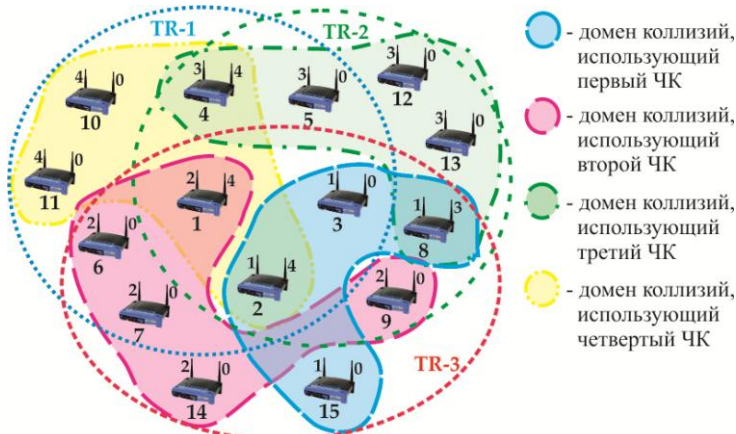


Рис. 9. Пример решения задачи распределения ЧК для mesh-сети №2

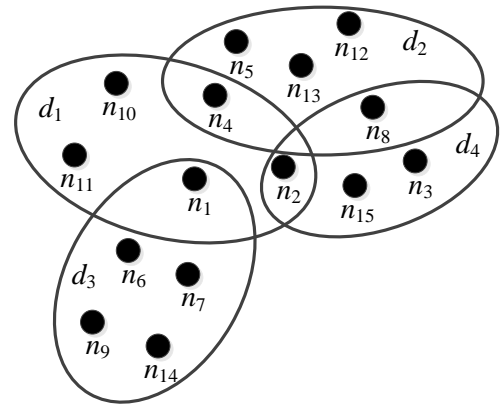


Рис. 10. Гиперграфовое представление результатов решения задачи распределения ЧК в mesh-сети №2

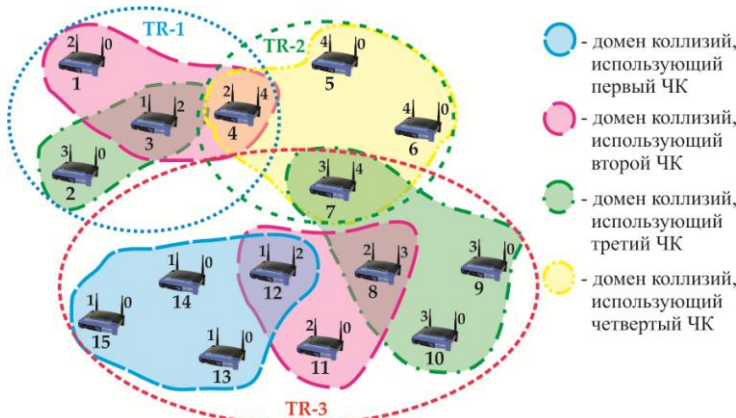


Рис. 11. Пример решения задачи распределения ЧК для mesh-сети №3

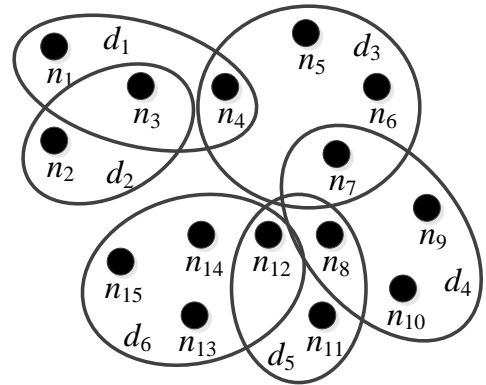


Рис. 12. Гиперграфовое представление результатов решения задачи распределения ЧК в mesh-сети №3

С использованием математического аппарата теории гиперграфов были получены характеристики конфигурируемых mesh-сетей на этапе постановки задачи распределения ЧК, а также характеристики структур mesh-сетей после решения указанной задачи. В ходе решения задачи использовалось четыре неперекрывающихся ЧК. Результаты расчетов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Характеристики гиперграфов mesh-сетей
на этапах постановки и решения задачи распределения ЧК

№ конфигурации mesh-сети	Характеристики гиперграфа				
	Степени ребер (зон устойчивого приема)	Степени вершин (станций)	Однородность гиперграфа (mesh-сети)	Связность гиперграфа (mesh-сети)	Связность подграфов (любых пар зон устойчивого приема)
Характеристики гиперграфа $H = (N, Z; R)$, с ответствующего возможным конфигурациям mesh-сетей №2 и 3					
№2	$ N(z_1) = 9$; $ N(z_2) = 9$; $ N(z_3) = 9$	$ Z(n_1) = Z(n_2) = Z(n_3) = 3$; ; $ Z(n_4) = Z(n_5) = Z(n_6) =$ $ Z(n_7) = Z(n_8) = Z(n_9) = 2$; ; $ Z(n_{10}) = Z(n_{11}) = Z(n_{12}) =$ $ Z(n_{13}) = Z(n_{14}) = Z(n_{15}) = 1$	9-однородный	7-связный	$H_{1,2}$ – 5-связный; $H_{1,3}$ – 5-связный; $H_{2,3}$ – 5-связный
№3	$ N(z_1) = 4$; $ N(z_2) = 4$; $ N(z_3) = 9$	$ Z(n_4) = Z(n_7) = 2$; $ Z(n_1) = Z(n_2) = Z(n_3) =$ $ Z(n_5) = Z(n_6) = Z(n_8) =$ $ Z(n_9) = Z(n_{10}) = Z(n_{11}) =$ $ Z(n_{12}) = Z(n_{13}) = Z(n_{14}) =$ $ Z(n_{15}) = 1$	неоднородный	1-связный	$H_{1,2}$ – 1-связный; $H_{1,3}$ – несвязный; $H_{2,3}$ – 2-связный
Характеристики гиперграфа $G = (N, D; Q)$, соответствующего результатам решения задачи распределения ЧК в mesh-сетях №2 и 3					
№2	$ N(d_1) = 5$; $ N(d_2) = 5$; $ N(d_3) = 5$; $ N(d_4) = 4$	$ D(n_1) = D(n_2) = D(n_4) =$ $ D(n_8) = 2$; $ D(n_3) = D(n_5) = D(n_6) =$ $ D(n_7) = D(n_9) = D(n_{10}) =$ $ D(n_{11}) = D(n_{12}) =$ $ D(n_{13}) = D(n_{14}) = D(n_{15}) = 1$	неоднородный	1-связный	$G_{1,2}, G_{1,3}, G_{1,4},$ $G_{2,4}$ – 1-связные; $G_{2,3}, G_{3,4}$ – несвязные
№3	$ N(d_1) = 3$; $ N(d_2) = 2$; $ N(d_3) = 4$; $ N(d_4) = 4$; $ N(d_5) = 3$; $ N(d_6) = 4$	$ D(n_3) = D(n_4) = D(n_7) =$ $ D(n_8) = D(n_{12}) = 2$; $ D(n_1) = D(n_2) = D(n_5) =$ $ D(n_6) = D(n_9) = D(n_{10}) =$ $ D(n_{11}) = D(n_{13}) =$ $ D(n_{14}) = D(n_{15}) = 1$	неоднородный	1-связный	$G_{1,2}, G_{2,3}, G_{3,4},$ $G_{4,5}, G_{5,6}$ – 1-связные; все остальные подгиперграфы несвязные

В работе проанализированы характеристики возможных конфигураций mesh-сетей, а также характеристики их структур, получаемые в результате решения задачи распределения ЧК (табл. 2). По результатам анализа были сформулированы факторы, определяющие качество решения задачи распределения ЧК:

- уменьшение размера зоны устойчивого приема приводит к уменьшению размеров создаваемых доменов коллизий, что способствует повышению общей производительности mesh-сети;

- использование однородной mesh-сети позволяет сформировать сбалансированные друг относительно друга домены коллизий;

- уменьшение степени перекрытия зон устойчивого приема приводит к формированию большего количества доменов коллизий, что способствует уменьшению их размеров, а также повышению производительности mesh-сети в целом.

Выводы

В работе предложен подход к использованию гиперграфов при моделировании многоканальных многоинтерфейсных mesh-сетей стандарта IEEE 802.11, как на этапе постановки задачи распределения частотных каналов, так и при анализе ее структуры. Это, в свою очередь, позволило более полно и детально описать возможные конфигурации как всей mesh-сети в целом, так и отдельных ее элементов представленных в виде вершин и ребер гиперграфа. Также приобретает новую формализацию задача определения связности. По сравнению с использованием графового представления возможной конфигурации mesh-сети, нет необходимости производить поиск независимых путей между всеми парами вершин графа. При использовании гиперграфового подхода решение задачи связности сводится к поиску максимального числа станций удаление которых приведет к делению mesh-сети на несколько несвязных компонент. Использование гиперграфов также позволяет определить роль и место той или иной станции в составе mesh-сети, в отличие от графового представления, которое непроизвольно «уравнивает» основные элементы системы. Предложенный математический аппарат должным образом может быть использован на этапе постановки задачи распределения неперекрывающихся частотных каналов, с целью оценки характеристик исходных конфигураций mesh-сетей, а также при сравнительном анализе результатов ее решения.

Список литературы: 1. Лемешко, А.В., Гаркуша, С.В. Классификация методов распределения частотных каналов в многоинтерфейсных многоканальных mesh-сетях стандарта IEEE 802.11 // Проблемы телекоммуникаций. – 2011. – № 2 (4). – С. 139 – 149. – Режим доступа: http://pt.journal.kh.ua/2011/2/1/112_lemeshko_classification.pdf. 2. Лемешко, А.В., Гоголева, М.А. Модель структурной самоорганизации многоканальной mesh-сети стандарта IEEE 802.11 // Проблемы телекоммуникаций. – 2010. – № 1 (1). – С. 83–95. – Режим доступа: http://pt.journal.kh.ua/2010/1/1/101_lemeshko_mesh.pdf. 3. Гаркуша, С.В. Разработка и анализ двухиндексной модели распределения частотных каналов в многоканальной mesh-сети стандарта IEEE 802.11 // Проблемы телекоммуникаций. – 2011. – № 3 (5). – С. 38 – 57. – Режим доступа: http://pt.journal.kh.ua/2011/3/1/113_garkusha_mesh.pdf. 4. Гаркуша, С.В. Анализ результатов распределения частотных каналов в многоканальных многоинтерфейсных mesh-сетях стандарта IEEE 802.11 // Цифрові технології : зб. наук. праць. – 2011. – Вып. 10. – С. 27-42. 5. Зыков, А.А. Основы теории графов. – М. : Наука, 1987. – 384 с. 6. Поповский, В.В., Лемешко, А.В., Евсеева, О.Ю. Симплициальная модель оценки структурной сложности телекоммуникационных систем // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2003. – Вып 5 (5). – С. 48-51. 7. Лемешко, А.В. Оценивание структурного разнообразия телекоммуникационных систем, представленных симплициальными моделями, по информационным показателям // Праці УНДІРТ. Вип. №2 (38). – Одеса : Видання УНДІРТ, 2004. – С. 77-79. 8. Зыков, А.А. Гиперграфы // Успехи математических наук. – № 6 (180) – 1974. – С. 86-154. 9. Berge, C. Graphs and Hypergraphs. – New York : Elsevier, 1973. – 528 p. 10. Berge, C. Hypergraphs: The Theory of Finite Sets. – Amsterdam, Netherlands: North-Holland, 1989. – 256 p. 11. Емеличев, В. А., Мельников, О. И., Сарванов, В. И., Тышкевич, Р. И. Лекции по теории графов. – М. : Наука, 1990. – 384 с.