УДК 621.391

М.А. ГОГОЛЕВА

МОДЕЛЬ БАЛАНСИРОВКИ СТАНЦИЙ С УЧЕТОМ ИХ АКТИВНОСТИ ПО ДОМЕНАМ КОЛЛИЗИЙ В МНОГОКАНАЛЬНЫХ MESH-СЕТЯХ

Введение

Mesh-сети являются новым перспективным классом широкополосных беспроводных сетей передачи мультимедийной информации, который в последнее время нашел широкое применение. Одним из главных аспектов их построения является принцип самоорганизации архитектуры, обеспечивающий такие возможности, как устойчивость сети при отказе отдельных компонентов, масштабируемость сети, контроль состояния сети и сниженное энергопотребление. Самоорганизация в данных сетях подразумевает под собой повышение степени автоматизации и адаптивности управления структурой сети и ее функциональными характеристиками. Но, несмотря на бурное развитие mesh-сетей, проблема повышения производительности является одной из основополагающих. Причем, даже с недавним принятием стандарта IEEE 802.11 n, основанного на поддержке технологий MIMO (Multiple Input – Multiple Output) и расширении полосы сигнала до 40 *МГц*, данная проблема остается достаточно актуальной. Для повышения производительности подобного рода сетей в рамках спецификации IEEE 802.11 s рекомендуется использовать несколько частотных каналов и применять mesh-станции с двумя или более радиоинтерфейсами. В связи с этим, актуальной задачей является распределение частотных каналов в многоканальной mesh-сети, которая относится к классу задач структурной самоорганизации.

Особенности частотного планирования в современных беспроводных технологиях

Основой для реализации mesh-сетей на сегодняшний день являются стандарты серии IEEE 802.11. Если рассматривать особенности частотного планирования в современных беспроводных технологиях, то в Северной Америке, Канаде и большей части Европы используется 11 каналов шириной 22 *МГц*, что позволяет организовать в диапазоне 2,4–2,483 ГГц три неперекрывающихся канала передачи – 1, 6, 11, с интервалом 5 *МГц* (таблица). Для некоторых стран Европы (Франция, Англия) для технологий IEEE 802.11 b/g доступны каналы 1÷13, что позволяет использовать в качестве неперекрывающихся уже четыре канала – 1, 5, 9 и 13. В Японии разрешается использование всех 14 каналов, но 14-й канал закреплен только за стандартом 802.11 g/n.

Канал	Частота (GHz)	США и Канада	страны Европы	Япония
1	2,412	да	да	да
2	2,417	да	да	да
3	2,422	да	да	да
4	2,427	да	да	да
5	2,432	да	да	да
6	2,437	да	да	да
7	2,442	да	да	да
8	2,447	да	да	да
9	2,452	да	да	да
10	2,457	да	да	да
11	2,462	да	да	да
12	2,468	нет	да	да
13	2,472	нет	да	да
14	2,484	нет	нет	Только 802.11 b

Обзор известных алгоритмов распределения частотных каналов в mesh-сетях

Необходимо отметить, что для поддержки одновременно нескольких частотных каналов (ЧК) каждая станция многоканальной сети должна быть оснащена двумя и более радиоинтерфейсами (РИ). Это позволяет уменьшить число станций, работающих на одном частотном канале, что приводит к существенному снижению интерференции и возможных коллизий, а в конечном итоге – минимизировать потери и задержки пакетов, повысив суммарную производительность многоканальной сети (МКС) [5].

Существует достаточно обширная классификация алгоритмов по распределению каналов в Mesh-сети серии стандартов IEEE 802.11 (рис. 1), например алгоритмы по скорости адаптации каналов (Rate-Adaption Channel Algorithm), алгоритмы эффективной рассылки (Efficient Multicast Algorithms), алгоритмы по способу управления каналами (C-Hyacinth, D-Hyacinth) и т. д.

Рис. 1. Алгоритмы распределения частотных каналов

По способу управления выделяют алгоритмы с централизованным управлением, при котором весь контроль за назначением каналов осуществляется единственной станцией (например, шлюзом), с распределенным управлением, когда каждый из узлов принимает решение о назначении каналов на свои радиоинтерфейсы самостоятельно, а также гибридный способ, при котором за назначение каналов отвечают всего несколько станций сети, например, все лидеры кластеров. Как показали исследования [5], даже при использовании всего двух радиоинтерфейсов на каждой из mesh-станций удается добиться значительного увеличения пропускной способности сети по сравнению с одноканальным решением. Однако для получения приемлемого, но далеко не оптимального результата, процесс решения задачи распределения частотных каналов в МКС в целом носит итерационный характер. В случае, когда к приведенной последовательности двух задач (закрепление РИ за соседней станцией с разбивкой сети на кластеры и выделение РИ mesh-станций одного кластера определенного частотного канала) добавляется третья задача – задача маршрутизации, то в методе соответственно растет и число итераций. Таким образом, чем выше требования к согласованности получаемых решений, тем больше итераций необходимо выполнить в ходе расчетов, тем более инерционным становиться сам процесс распределения ЧК по РИ, что является недостатком таких методов.

Алгоритмы распределения каналов можно также классифицировать по длительности привязки к радиоинтерфейсам. При использовании статического алгоритма распределение каналов происходит редко, при динамическом – часто, и при гибридном – часть каналов распределяются редко и часть часто. Одно из преимуществ данных алгоритмов состоит в быстрой реакции на перегрузку или загруженность станций. В случаях изменения топологии сети используются алгоритмы распределения каналов, основанные на скорости адаптации каналов к изменению сетевой структуры и эффективной рассылки об изменениях топологии. Одними

из основных недостатков данных алгоритмов являются высокая временная задержка при повторном распределении каналов между радиоинтерфейсами mesh-станций в сети и увеличение в сети служебной информации.

При анализе данных алгоритмов стоит отметить, что эффективность распределения частотных каналов в МКС напрямую зависит от согласованности решений задач кластеризации, закрепления радиоинтерфейсов и выделения им соответствующих частотных каналов. Помимо этого, следует, также, учитывать активность и территориальную удаленность станций, что влияет на выбор маршрута передачи данных, энергопотребление станции и т.д. Активность станций зависит от ряда факторов, таких как количество подключенных пользователей, интенсивность входящего и исходящего трафика, типа трафика (речь, видео, данные) и т.д.

Недостатки алгоритмов обусловлены несовершенством положенных в их основу математических моделей, отсутствием в них процедуры распределения частотных каналов. Поэтому, необходимо разработать математическую модель, которая учитывает активность станций, достаточно полно описывает МКС как объект исследований, и позволяет получать искомые результаты необходимой точности с приемлемыми временными и вычислительными затратами.

Математическая модель распределения частотних каналов с учетом активности mesh-станций

В основу данной работы положено усовершенствование ранее предложенной модели распределения частотных каналов в многоканальной mesh-сети [6] Кроме того, предусматривается, что N – количество mesh-станций; m – число радиоинтерфейсов на одной mesh-станции; K – количество неперекрывающихся частотных каналов в mesh-сети. В качестве управляющей выбрана булевая переменная:

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

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

При расчете искомых переменных $x_{i,j}^{k}$ в соответствии с физикой решаемой задачи необходимо выполнять ряд важных условий-ограничений:

1. Условие включения i-й станции в сеть:

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

где $1 \leq m^* \leq m$ – целочисленный параметр, характеризующий минимально необходимое число включенных РИ на произвольно выбранной mesh-станции;

2. Условие выделения j-му радиоинтерфейсу i-й станции не более одного ЧК:

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

3. Условие закрепления k-го частотного канала на i-й станции не более чем за одним радиоинтерфейсом:

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

4. Условие работы двух mesh-станций друг с другом не более чем на одном ЧК:

$$\sum_{k=1}^{K}\left[\sum_{j=1}^{m} x_{i,j}^{k}\cdot\sum_{l=1}^{m} x_{s,l}^{k}\right]\le 1 \quad \text{(для каждой } (i,s)\text{-пары mesh-станций одной TR, } i\ne s\text{)}, \qquad (5)$$

которое вводится для устранения нежелательной структурной избыточности сети;

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

$$p=\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{m}\sum_{k=1}^{K} x_{i,j}^{k}\ge N+K-1, \qquad (6)$$

выполнение которого совместно с условием (5) в условиях дефицита ЧК ($K\le N-1$) гарантирует, что число включенных РИ (p) с учетом числа mesh-станций и поддерживаемых в ТБС частотных каналов обеспечит связность сети.

6. Условия балансировки числа mesh-станций по доменам коллизий:

$$\sum_{i=1}^{N} d_{z,i}\cdot\beta_i\sum_{j=1}^{m} x_{i,j}^{k}\le\alpha \quad \text{(для каждой } (z,k)\text{-пары, } z=\overline{1,Z},\ k=\overline{1,K}\text{)}, \qquad (7)$$

где β_i – коэффициент активности i-й станции; z – номер зоны устойчивого приема; α – верхний динамически управляемый порог числа mesh-станций в произвольно выбранном домене коллизий сети.

Для получения более точной формализации условия (7), рекомендуется использовать нормированный коэффициент активности mesh-станций, но условие при этом будет иметь нелинейный характер.

$$\sum_{i=1}^{N} d_{z,i}\cdot\left[\frac{\beta_i}{\sum_{k=1}^{K}\sum_{j=1}^{m} x_{i,j}^{k}}\right]\sum_{j=1}^{m} x_{i,j}^{k}\le\alpha \quad \text{(для каждой } (z,k)\text{-пары, } z=\overline{1,Z},\ k=\overline{1,K}\text{)}, \qquad (8)$$

где выражение $\dfrac{\beta_i}{\sum_{k=1}^{K}\sum_{j=1}^{m} x_{i,j}^{k}}$ является нормированным коэффициентом активности станции, который учитывает рапределение трафика i-й станции по подключаемым радиоинтерфейсам, где $\sum_{k=1}^{K}\sum_{j=1}^{m} x_{i,j}^{k}$ - количество используемых РИ на i-й станции.

Расчет искомых переменных (1) и параметра α в соответствии с условиями-неравенствами (2) – (7), целесообразно осуществить в ходе решения оптимизационной задачи, обеспечивая минимум работающих mesh-станций в создаваемых доменах коллизий, что, как известно, способствует повышению общей производительности сети. Тогда в рамках предложенной математической модели (1) – (7) задача распределения ЧК в mesh-сети приобретает вид оптимизационной, в ходе решения которой необходимо обеспечить

$$\min_{x,\alpha}\alpha, \qquad (9)$$

при выполнении условий (1) – (8). Сформулированная задача с точки зрения физики процессов, протекающих в mesh-сети, относится к классу задач балансировки числа Mesh-станций по доменам коллизий с учетом активности станций, а с математической точки зрения – это задача смешанного целочисленного нелинейного программирования – MILNP (mixed-integer nonlinear programming), в которой искомые переменные $x_{i,j}^{k}$ (1) являются булевыми, мини-

мизируемая переменная α является целочисленной, а ограничения на искомые переменные носят как линейный (1) – (4), (6) и (7), так и квадратичный (5) характер.

Выводы

Задача распределения частотных каналов в МКС является достаточно важной и способствует повышению уровня структурной самоорганизации mesh-сетей. Но, несмотря на большое количество предложенных алгоритмов распределения частотных каналов в многоканальных mesh-сетях, все они подразумевают под собой последовательное решение задач закрепления частотных каналов за радиоинтерфейсами, перераспределение каналов и т. д. С целью обеспечения адаптивности процессу распределения ЧК в МКС порядок закрепления частотных каналов за радиоинтерфейсами Mesh-станций может быть изменен (периодически или по требованию) в зависимости от динамики изменения исходных данных для решения поставленной задачи: общего числа Mesh-станций в сети, их характеристик, требований к связности МКС и т.д.

В рамках данной модели задача распределения частотных каналов представлена в виде задачи балансировки числа mesh-станций с учетом их активности и территориальной удаленности, создаваемым по доменам коллизий. Положительной чертой данной модели, также, является согласованность решений задач выделение на станции РИ и закрепление за ними частотних каналов. Дальнейшее развитие математической модели видится в учете функциональных характеристик сети и, следовательно, в решении задач структурно-функционального синтеза в многоканальных mesh-сетях.

Список литературы: 1. *Вишневский В.М., Портной Л.С., Шахнович И.В.* Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G. М.: Техносфера, 2009. 472 с. 2. *Рошан П., Лиэри Д.* Основы построения беспроводных локальных сетей стандарта 802.11. М.: Издательский дом «Вильямс», 2004. 304 с. 3. *Duffy K., Leith D.J., Li T., Malone D.* Modeling 802.11 mesh networks // IEEE Comm. Magazine.New York: 2007. vol. 10, no 6. PP 635-637. 4. *Naveed A., Salil S. Kanhere, Sanjay K. Jha.* Topology Control and Channel Assignment in Multi-radio Multi-channel Wireless Mesh Networks // Proc. of MASS '07. 2007. №7. PP. 1-9. 5. *Ляхов А.И., Пустогаров И.А., Шпилев С.А.* Многоканальные mesh-сети: анализ подходов и оценка производительности // Информационные процессы. 2008. Т. 8, № 3. С. 173-192. 6. *Лемешко А.В., Гоголева М.А.* Трехиндексная математическая модель распределения частотных каналов в многоканальных MESH-сетях.// Збірник наукових праць. НАУ ІПМЕ. ім. Г.Є. Пухова. 2009. № 54. С. 94-103. 7. *Raniwala, A. Tzi-cker Chiueh.* Architecture and algorithms for an IEEE 802.11-based multi-channel wireless mesh network // Proc. of INFOCOM '05. Vol. 3. PP. 2223- 2234. 8. *Naveed A., Salil S. Kanhere, Sanjay K. Jha.* Topology Control and Channel Assignment in Multi-radio Multi-channel Wireless Mesh Networks // Proc. of MASS '07., 2007. №12. PP. 1-9.

Харьковский национальный
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 10.01.2010