

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КАНАЛОВ В МНОГОКАНАЛЬНЫХ MESH-СЕТЯХ СТАНДАРТА IEEE 802.11

Введение

Одним из наиболее перспективных направлений развития современных телекоммуникационных технологий являются беспроводные сети. В первую очередь перспективы их использования связаны с возможностью замены кабельной инфраструктуры на радиоэфир, а также появлением новых возможностей коммуникации между различными устройствами. При этом, наряду с постоянным улучшением доступности связи для мобильных пользователей, рынок беспроводных систем направлен на расширение диапазона предоставляемых пользователю услуг, что в свою очередь требует повышения производительности и улучшения основных показателей качества обслуживания. Существует ряд способов повышения производительности беспроводных телекоммуникационных сетей (ТКС), основными из которых являются: разнесение сигнала по поляризации, изменение территориального местоположения станции, использование технологии интеллектуальных антенных решеток, объединение каналов, использование технологии MIMO, использование многоканальных mesh-сетей, маршрутизация [1-3]. Наиболее высокого результата для повышения производительности беспроводной сети можно достигнуть при использовании многоканальных mesh-сетей, предполагающих использование как одного, так и нескольких радиointерфейсов на mesh-станции, каждый из которых настроен на отдельный канал. Однако для реализации многоканальных решений следует учитывать такие факторы, как выбор используемого метода распределения каналов в mesh-сети, совместимость mesh-устройств с точки зрения поддерживаемых стандартов, размерность сети, а также учет особенностей частотного планирования в беспроводной сети (количество неперекрывающихся частотных каналов). В качестве основополагающего фактора, влияющего на эффективность использования многоканальных mesh-сетей, как правило, выступает выбранный метод распределения каналов между станциями в сети.

На сегодняшний день известно достаточно большое количество методов решения задачи распределения каналов в многоканальных mesh-сетях [4-6], основными из которых являются Rate-Adaption Channel Algorithm, C-Hyacinth, D-Hyacinth, CoMTC. Однако к основным недостаткам известных решений стоит отнести, прежде всего, отсутствие согласованности в решениях подзадач кластеризации, закрепление радиointерфейсов и выделение им соответствующих каналов, а также недостаточный учет аппаратурных и технологических особенностей построения многоканальных mesh-сетей стандарта 802.11, территориальной удаленности и активности mesh-станций. В этой связи в статье предлагается математическая модель распределения каналов в многоканальных mesh-сетях, функционирующих на основе стека стандартов IEEE 802.11a/b/g/n/s, а также ее экспериментальное исследование, подтверждающее ее адекватность и эффективность.

Математическая модель распределения каналов в многоканальных mesh-сетях стандарта 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 в mesh-сети. Так, например, в технологии IEEE 802.11 b/g таких каналов 3÷4, а в технологии IEEE 802.11 a – 12 неперекрывающихся каналов.

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 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 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 предложенной модели в ходе решения задачи распределения каналов по радиоинтерфейсам 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, радиоинтерфейсов, 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 искомых переменных $x_{i,j}^k$ в каждой отдельно взятой G_z необходимо выполнить ряд важных условий-ограничений [7-8]:

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 радиоинтерфейсов (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.

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

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

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

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

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

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

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

5. Условие того, что произвольная mesh-станция на включенном на ее радиointерфейсе и закрепленном за ним канале работает хотя бы с одной станцией своей зоны устойчивого приема:

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

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

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:

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

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

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

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

где K^* – количество каналов используемых в mesh-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 одной зоне устойчивого приема и в одном домене коллизий, т.е. работают на одном канале. Целесообразно, чтобы количество mesh-станций в доменах было одинаковым, т.е. имела место балансировка количества mesh-станций в домене. С этой целью введем условие балансировки mesh-станций в домене коллизий.

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 дина-

мически 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 зоне устойчивого приема.

8.3. Важным фактором при балансировке числа mesh-станций по доменам коллизий является их активность, под которой в данном случае будем понимать частоту выхода станции в радиоэфир, длительность сеансов и интенсивность передаваемого трафика. В связи с этим, условие балансировки mesh-станций по доменам коллизий может принять следующую формулировку:

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

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

8.4. В связи с неравномерной нагрузкой на РИ mesh-станции и ввиду работы их по различным направлениям, для получения более точной формализации в условии (11) рекомендуется использовать нормированный коэффициент активности mesh-станций

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

где $\frac{\beta_i}{\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{m_i} x_{i,j}^k}$ – нормированный коэффициент активности станции, который учитывает рас-

пределение трафика i -й станции по подключаемым радиоинтерфейсам, т. е. по смежным mesh-станциям.

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 распределения каналов в многоканальной mesh-сети. В связи с тем, что количество станций в территориально-распределенных mesh-сетях значительно преобладает над количеством 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

[6-8], способствует повышению общей производительности многоканальной mesh-сети. Тогда в рамках предложенной математической модели (1)-(12) задача 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 (1)-(12).

Исследование разработанной модели распределения каналов в многоканальных mesh-сетях стандарта 802.11

При решении поставленных задач для получения наиболее полной информации о функционировании беспроводной сети на базе предложенной модели использовались средства аналитического и имитационного моделирования. Для проведения имитационного моделирования первоначально были проанализированы наиболее используемые программные пакеты (симуляторы), которые способны с определенной точностью моделировать функционирование mesh-сети в целом или отдельных ее процессов. К основным из них относятся Network Simulator v.2 и v.3, OPNET, Wi-Fi Simulator 802.11, Wi-Fi Mesh Simulator Pro, OMNET [9-10]. Однако в результате сравнительного анализа перечисленных симуляторов был выбран пакет Network Simulator v.3 (ns3). Выбор пакета ns3 обусловлен наличием необходимой математической поддержки, что позволило генерировать различные виды трафика в mesh-сетях. Гибкость использования ns3 заключалась в возможности реализовывать собственные математические функции в частности на языке на C++ для исследования предложенных моделей и методов распределения каналов в многоканальных mesh-сетях. В рамках ns3 также предоставляется полное управление каналами, количеством радиointерфейсов, расстоянием между mesh-станциями и другими параметрами mesh-сети, а также поддерживается возможность мониторинга таких показателей качества обслуживания сети как средняя задержка, джиттер, производительность, уровень потерь и т.д.

Основной задачей экспериментального исследования предложенной модели является анализ влияния процесса распределения каналов за радиointерфейсами mesh-станций на показатели качества обслуживания (например, среднюю задержку и джиттер). Для проведения имитационного моделирования на базе ns3 была создана имитационная модель, структура которой представлена в виде взаимосвязанных блоков (рис. 1).

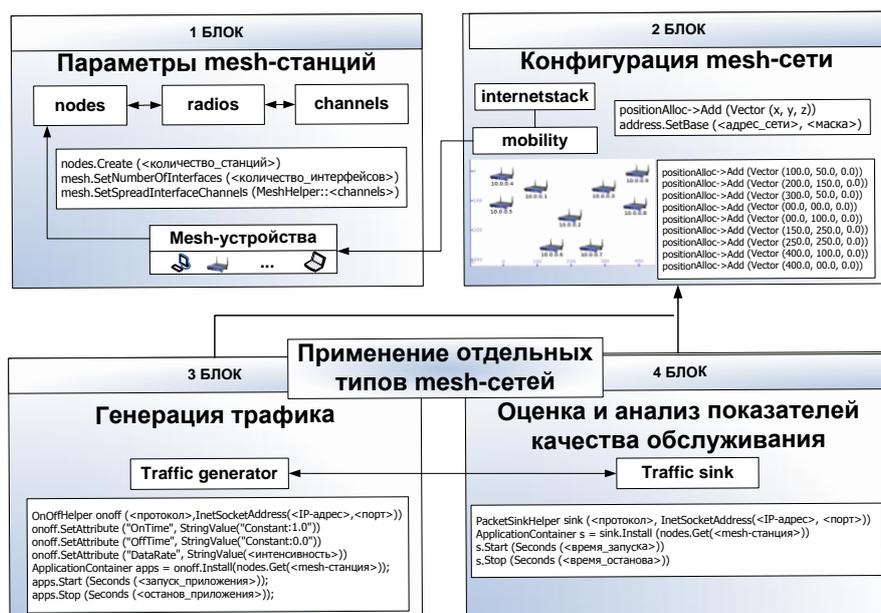


Рис. 1

Как показано на рис.1 первый блок в структуре имитационной модели распределения каналов содержит три основных подблока: «nodes», «radios» и «channels». В подблоке «nodes» задается количество mesh-станций, которые будут созданы в процессе моделирования, в подблоке «radios» – количество радиointерфейсов на каждой станции, а в подблоке «channels» – количество используемых каналов в mesh-сети.

Второй блок определяет конфигурацию mesh-сети, которая описывает территориальную удаленность каждой mesh-станции в сети и назначение ей IP-адресов. Для учета территориальной удаленности mesh-станций использовалась функция позиционирования, которая задает значения по трём осям координат, предоставляя, тем самым, возможность размещения в пространстве каждой mesh-станции в сети.

Для задания IP-адресов интерфейсам станций использовалась функция назначения mesh-станциям начальных сетевых адресов и масок подсети, к примеру 10.0.0.0 или 192.168.1.0 и 255.255.255.0. Далее каждой созданной mesh-станции назначался IP-адрес в автоматическом порядке согласно алгоритму симулятора.

Третий блок в структуре имитационной модели (рис. 1) представляет собой набор функций, отвечающий за генерирование трафика и задание его характеристик, и в котором указывается:

- протокол транспортного уровня (ns3::TcpSocketFactory, ns3::UdpPacketFactory и т.д.);
- адрес станции-получателя трафика;
- интенсивность генерируемого трафика;
- время запуска приложения на выполнение и время его остановки.

Четвертый блок представляет собой набор функций, отвечающих за прием и анализ трафика (рис. 1). В данном блоке проводится анализ принятых пакетов на станции-получателе, на которую были отосланы пакеты из приложения-генератора трафика. Причем, для того чтобы приложение-получатель могло принимать трафик от приложения-генератора, оно должно быть установлено на соответствующей станции и настроено на анализ соответствующего IP-адреса, порта и протокола. Для этого, в приложении данного блока задается:

- тип протокола, IP-адрес и порт, на который адресуется трафик из приложения-генератора;
- адрес станции, на которой будет осуществлен анализ трафика;
- время запуска приложения на выполнение и время его остановки;
- задание общей длительности выполнения модели – Simulator::Stop (Seconds(<длительность>)).

На основании имитационной модели был проведен анализ показателей эффективности распределения каналов в многоканальных mesh-сетях различных типов, т.е. с различным количеством используемых радиointерфейсов на станции и каналов [11-12]:

- mesh-сети, использующие один радиointерфейс и один канал (Single-Radio Single-Channel Wireless Mesh Networks, SR SC WMN) и которые предназначены для организации абонентского доступа и транспортного канала между точками;

- mesh-сети, использующие два радиointерфейса и один канал (Dual-Radio Single-Channel Wireless Mesh Networks, DR SC WMN), в которых один из радиointерфейсов применяется для организации абонентского доступа (2,4 ГГц), а другой, для транспортного канала (5,8 ГГц);

- многоканальные mesh-сети, использующие один радиointерфейс (Single-Radio Multi-Channel Wireless Mesh Networks, SR MC WMN), позволяют организовать (так же, как и в решениях DR SC WMN) разделение абонентского и транспортного потоков, но благодаря возможности переключения одного радиointерфейса с канала, организующего абонентский доступ на транспортный канал позволяет избавиться от интерференционных помех;

- многоканальные mesh-сети, использующие несколько радиointерфейсов (Multi-Radio Multi-Channel Wireless Mesh Networks, MR MC WMN), благодаря чему существует возможность увеличения производительности беспроводной сети в среднем 2-3 раза по сравнению с

SR SC WMN за счет уменьшения количества станций, работающих на одном канале, избавится от проблемы «скрытой» станции, интерференционных помех и т.д.

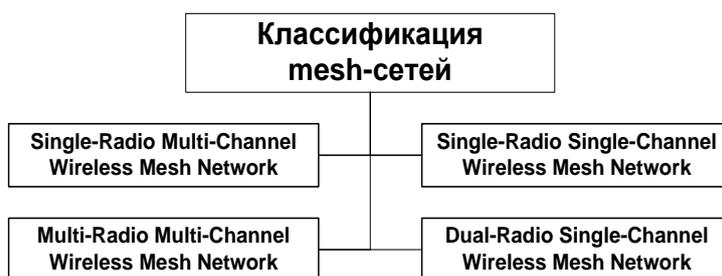


Рис. 2

Экспериментальные исследования были проведены в рамках предложенной модели распределения каналов по показателям качества обслуживания (средняя задержка, джиттер, потери пакетов и т.д.) для различной интенсивности трафика (от 128 Кбит/с до 3 Мбит/с). В случае перегрузки mesh-сети, т.е. при резком ухудшении показателей средней задержки и джиттера, рост интенсивности генерирования трафика прекращался.

Для проведения имитационного моделирования в пакете ns3 количество mesh-станций варьировалось от 5 до 50. После территориального распределения mesh-станций производилось автоматическое назначение IP-адресов, настройка приложения-генератора трафика и приложения-анализатора трафика (рис. 1). Для оценки эффективности функционирования многоканальной mesh-сети на базе разработанной модели, т.е. mesh-сети типа Multi-Radio Multi-Channel, при имитационном моделировании за основу были взяты основные функции, настроенные в соответствии с моделью (1)-(13) на согласованное решение таких задач, как выделение радиointерфейсов на mesh-станциях и закрепление за ними каналов. В результате моделирования mesh-сети на базе предложенной модели распределения каналов были получены зависимости средней задержки от интенсивности трафика (рис. 3).

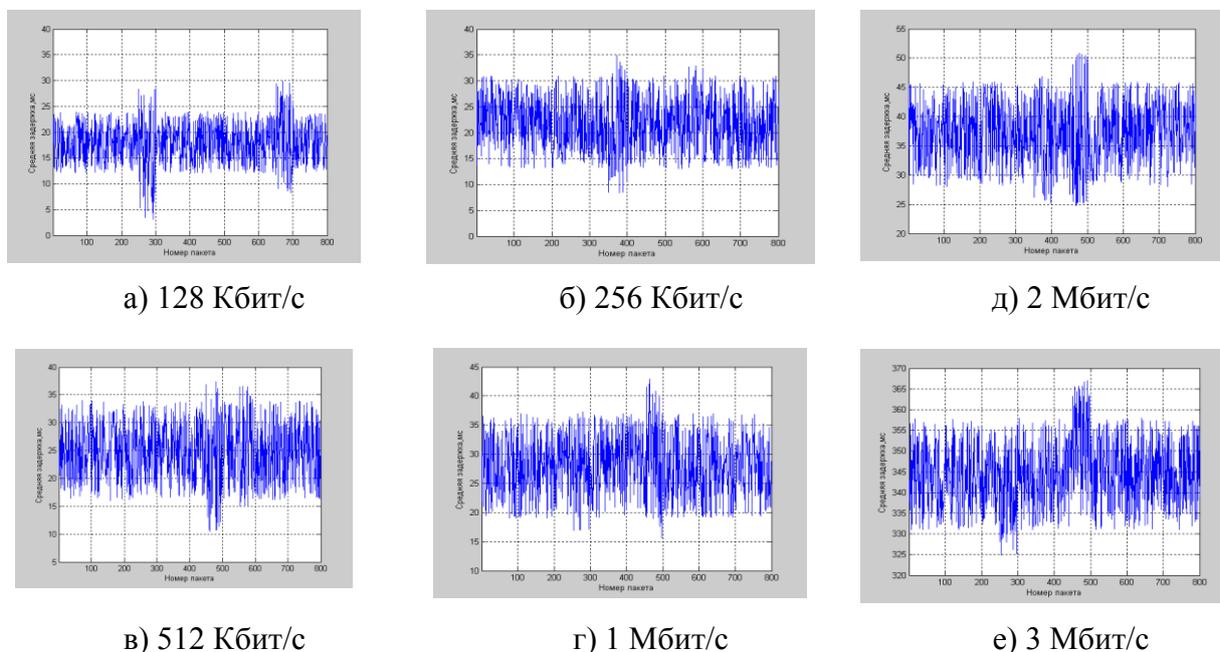


Рис. 3

Результаты усредненных значений средней задержки и джиттера при моделировании различных типов многоканальных mesh-сетей приведены в табл. 1.

Таблица 1

Интенсивность трафика	SR SC WMN		SR MC WMN		DR MC WMN		MR MC WMN	
	Средняя задержка, мс	Джиттер, мс						
128 Кбит/с	26	10	21	7	15	7	18	6
256 Кбит/с	30	14	24	9	23	8	21	7
512 Кбит/с	35	16	28	12	26	10	24	9
1 Мбит/с	37	18	39	16	35	14	28	12
2 Мбит/с	687	40	607	38	38	17	37	18
3 Мбит/с	-	-	-	-	345	40	340	38

Анализируя результаты моделирования многоканальной mesh-сети типа Multi-Radio Multi-Channel стоит отметить, что при исследовании функционирования многоканальной mesh-сети на базе разработанной модели распределения каналов перегрузка произошла при интенсивности 3 Мбит/с, что на 20-25% выше, чем при исследовании известного централизованного метода распределения каналов C-Huacynth. Также при интенсивностях трафика до 2 Мбит/с наблюдалась стабильность показателей задержки и джиттера, что свидетельствует об увеличении производительности сети на базе предложенной модели распределения каналов. Таким образом, при исследовании различных типов mesh-сетей посредством имитационного моделирования на базе симулятора ns3 установлено, что использование многоканальных mesh-сетей типа Multi-Radio Multi-Channel на базе разработанной модели приводит к значительному улучшению показателей качества обслуживания сети относительно других типов mesh-сетей исходя из показателей качества обслуживания.

Результаты сравнительного анализа различных типов mesh-сетей для наглядности представлены на одном графике (рис. 3), который отображает зависимость средней задержки для различных значений интенсивности потока.

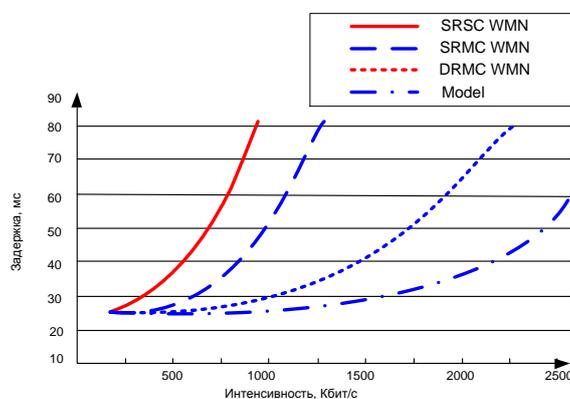


Рис. 3

Из рис. 3 видно, что при моделировании различных типов mesh-сетей явное преимущество по показателям задержки имеет многоканальная mesh-сеть типа MR MC, в основу которой положена разработанная модель распределения каналов, что подтверждает функциональность сети относительно других известных методов распределения и повышает производительность сети в среднем в 1,7-2 раза.

Для наглядного сравнения различных типов mesh-сетей по показателям джиттера на рис. 4 представлены соответствующие его зависимости от интенсивности трафика.

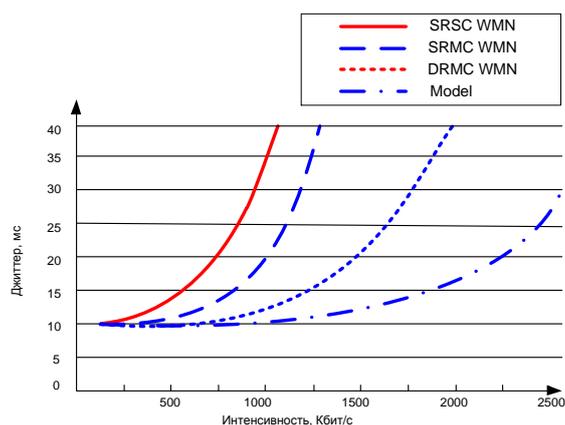


Рис. 4

Результаты анализа свидетельствуют о том, что использование предложенной модели позволяет повысить производительность сети в среднем в 1,5-1,7 раз по сравнению с тип сетью DR MC WMN, и в 2,4- 2,7 раза по сравнению с решением на базе SR MC WMN. Для фиксированной производительности сети, использования разработанной модели привело к улучшению средней задержки в 1,6-2,3 раза, а джиттера, в 1,7-2,5 раза по сравнению с методом C-Нуасинт [13, 14].

Выводы

В статье представлены экспериментальные исследования разработанной модели с использованием возможностей пакета имитационного моделирования ns3. Проанализированы mesh-сети таких типов, как Single-Radio Single-Channel, Single-Radio Multi-Channel, Dual-Radio Multi-Channel. Осуществлен анализ показателей эффективности распределения каналов в многоканальных mesh-сетях предложенной модели по показателям качества обслуживания.

В ходе сравнительного анализа установлено, что использование предложенной модели позволяет повысить производительность сети в среднем в 1,5-1,7 раза или улучшить среднюю задержку в 1,6-2,3 раза, а джиттер – в 1,7-2,5 раза по сравнению с методом C- Нуасинт. Кроме того, реализация предложенного решения позволяет повысить производительность mesh-сети в среднем в 1.2-1.8 раза по сравнению с методом CoMTaC, и в 1,3-1,85 раза по сравнению с методом C-Нуасинт в условиях роста количества mesh-станций, неравномерности их территориальной удаленности и активности.

Полученные результаты свидетельствуют в целом об адекватности предложенной модели и ее отдельных условий, т.е. в результате расчетов была сформирована связанная структура доменов коллизий, что позволяет обеспечить информационный обмен между произвольной парой станций многоканальной mesh-сети. Также использование разработанной модели распределения каналов не только способствует повышению производительности многоканальной mesh-сети, но и, благодаря введенным условиям, позволяет избавиться от эффекта «скрытой» станции, уменьшить интерференцию, взаимные помехи, влияния и т.д.

Предложенная модель распределения каналов отвечает требованиям современных концепций по построению и функционированию многоканальных mesh-сетей, расширяя область их применения. Практическая реализация разработанной модели и метода распределения каналов не связана с коренным пересмотром принципов построения и функционирования существующих беспроводных сетей.

Список литературы: 1 Рошан П. Основы построения беспроводных локальных сетей стандарта 802.11: пер. с англ. / П. Рошан, Д. Лиэри. Пер. с англ. М.: Издат. дом «Вильямс», 2004. 304 с. 2. Aggielou G. Wireless Mesh Networking // G. Agg'elou, B.Eng. Athens, 2009. 548 p. 3. IEEE P802.11s/D1.0. Draft STANDARD for Information Technology // Telecommunications and information exchange between systems. Local and metropolitan area

networks. Specific requirements. Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications Amendment: Mesh Networking [Electronic resource] // IEEE Standards Activities Department. [USA]: IEEE, 2006. 4. *IEEE P802.11s/D2.0. Draft STANDARD for Information Technology* // Telecommunications and information exchange between system. Local and metropolitan area networks. Specific requirements . 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications Amendment: Mesh Networking [Electronic resource] / IEEE Standards Activities Department.[USA]: IEEE, 2008. 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., Симоненко Д.В.* Модель распределения частотных каналов с учетом территориальной удаленности станций в многоканальных mesh-сетях // Збірник наукових праць Харківського університету повітряних сил. Харків, 2009. Вип. 4(22). С. 38-41. 7. *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. 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. PP. 1-9.1975. Vol. 25, №1. P.73-85. 9. *Vaidya N.* Multi-Channel MAC for Ad Hoc Networks: Handling Multi-Channel Hidden Terminals Using a Single Transceiver / N. Vaidya, So J. // ACM MobiHoc, 2004. P. 222-233. 10. *Issariyakul Teerawat* Introduction to Network Simulator NS2 / Teerawat Issariyakul, Ekram Hossain. Springer Science+Business Media, 2009. 400 p. 11. *Draves R.* Routing in multi-radio, multi-hop wireless mesh networks // In ACM International Conference on Mobile Computing and Networking (MOBICOM), 2004. P. 114-128. 12. *Alicherry M.* Joint Channel Assignment and Routing for Throughput Optimization in Multi-radio Wireless Mesh Networks // In ACM MobiCom, Cologne, Germany, 2005. P. 237- 255. 13. *Лемешко А.В., Гоголева М.А.* Трехиндексная математическая модель распределения частотных каналов в многоканальных MESH-сетях.// Збірник наукових праць НАУ ППМЕ. ім. Г.Є. Пухова. № 54. Львів, 2009. С.94-103. 14. *Raniwala A., Gopalan K., Chiu T.* Centralized channel assignment and routing algorithms for multi-channel wireless mesh networks // ACM Mobile Computing and Communications Review. 2004. Vol. 8. PP. 50-65.

*Харьковский национальный
университет радиоэлектроники*

Поступила в редколлегию