

УДК 621.396

А.А.Жилина, М.А.Дружинин  
**АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПЕРЕДАЧИ  
СИНХРОНИЗИРУЮЩИХ КАДРОВ BEACON FRAME В  
БЕСПРОВОДНЫХ ЯЧЕЙСТЫХ СЕТЯХ СТАНДАРТА IEEE 802.11S**

*Российский новый университет  
Воронежский институт высоких технологий*

*В работе решаются несколько задач: проведено исследование принципов построения беспроводных ячеистых сетей; дан анализ особенностей реализации процедуры синхронизации в беспроводных ячеистых сетях стандарта IEEE 802.11s; проведена разработка аналитической модели механизма передачи синхронизирующих кадров Beacon frame в сети полносвязной топологии. При проектировании и реализации беспроводной ячеистой сети стандарта IEEE 802.11s появляются возможности для коррекции параметров передачи синхронизирующих кадров в зависимости от количества mesh-устройств в сети и получения заданной вероятности выполненной доставки синхрокадров. Можно формировать беспроводную ячеистую сеть IEEE 802.11s с прогнозируемой эффективностью и ожидаемой пропускной способностью.*

**Ключевые слова:** модель, беспроводная сеть, распространение радиоволн, синхронизация.

Информационные сети передачи данных, созданные по топологии ячеистых сетей, в настоящее время становятся всё более востребованными, и приобретают широкое распространение в современной жизни [1, 2].

В настоящее время наблюдается повышенный интерес к беспроводным сетям с механизмом распределенного управления сетью на канальном уровне.

Так, в комитете IEEE по стандартам созданы группы 802.11s (Wi-Fi Mesh) и 802.15.5 (High Rate WPAN Mesh), ведущие разработку перспективных протоколов ячеистых сетей, а альянс ведущих телекоммуникационных компаний мира WiMedia предложил свой стандарт персональных сетей ECMA 368 для беспроводного соединения периферийных устройств между собой [3, 4].

Целью данной работы является разработка аналитической модели для сравнительного анализа эффективности функционирования механизма синхронизации в беспроводных ячеистых сетях стандарта IEEE 802.11s с функцией распределенного управления.

С помощью синхронизирующих кадров Beacon frame все беспроводные устройства объявляют своё участие в mesh-сети, рассылают информацию о своих возможностях, производят синхронизацию своих внутренних часов с часами других узлов.

Также синхрокадры Beacon frame могут использоваться в качестве контейнеров для распространения специальных служебных пакетов, как например, механизмами энергосбережения или резервирования канала [5].

В связи с такой функциональной нагрузкой и важностью, которую несут кадры Beacon frame, процедуру их рассылки стремятся сделать более надежной, чем рассылку других широкополосных кадров. Ширина зоны покрытия передающего устройства, находится в обратной зависимости от скорости передачи данных в эфир. Учитывая этот факт, Beacon frame всегда передаются на наименьшей возможной базовой скорости, а данные – на самой большой скорости из поддерживаемых оборудованием аппаратно и программно.

Согласно стандарту 802.11n, мы будем рассматривать его как наиболее прогрессивный и получивший широкое распространение, индекс модуляции и схемы кодирования MCS (modulation and Coding Scheme) определяется как целое число от 0 (соответствует самому медленному, но и самому надёжному режиму) до 31 (самый быстрый, но крайне чувствительный к внешним помехам режим).

Индекс определяет конкретный тип модуляции радиочастоты, скорость кодирования (coding rate), защитный интервал (guard interval) и ширину канала (20МГц или 40МГц). В сочетании эти параметры определяют заданную теоретически-возможную скорость передачи данных, начиная от 6,5 Мбит/с до 600 Мбит/с.

Большое влияние на характеристики передачи в беспроводных каналах оказывают различные помехи [6-8]. Ещё одним важным фактором, влияющим на скорость передачи, является количество параллельных потоков.

Стандартом 802.11n предусмотрено максимальное число каналов 4. Также, важную роль играет выбор типа модуляции и метода кодирования. Все методы кодирования, которые применяются в беспроводных Wi-Fi сетях, являются помехозащищёнными и предполагают добавление в поток передаваемых данных избыточной информации. Если избыточных битов будет слишком много, то скорость передачи полезной информации определено снизится.

Стандартом 802.11n максимальная относительная скорость кодирования может достигать 5/6, то есть на 5 битов данных может передаваться один избыточный. В Таблице 1 приведены скорости обмена данными в стандарте 802.11n .

Таким образом, можно заключить, что при использовании технологий стандарта IEEE 802.11n кадры Beacon frame будут передаваться со скоростью 6,5 Мбит/с, а данные (в зависимости от применяемого оборудования и фактических условий приема) – на скоростях до 600 Мбит/с.

Таблица 1 – Скорость передачи данных при различных типах модуляции

Модуляция	Относительная скорость кодирования	Полоса пропускания, МГц	Количество поднесущих	Число каналов	Скорость передачи данных при ЦП = 800 нс	Скорость передачи данных при ЦП = 400 нс
BPSK	1/2	20	52	1	6,5	7,2
64-QAM	5/6				65	72,2
BPSK	1/2			2	13	14,4
64-QAM	5/6				130	144
BPSK	1/2			3	19,5	21,7
64-QAM	5/6				195	216,7
BPSK	1/2			4	26	28,9
64-QAM	5/6				260	288,9
BPSK	1/2	40	108	1	13,5	15
64-QAM	5/6				135	150
BPSK	1/2			2	27	30
64-QAM	5/6				270	300
BPSK	1/2			3	40,5	45
64-QAM	5/6				405	450
BPSK	1/2			4	54	60
64-QAM	5/6				540	600

Примечание: ЦП — циклический префикс.

Напомним, что все узлы беспроводной ячеистой сети являются синхронными, т.е. могут передавать кадры Beacon frame друг другу одновременно. Поскольку рассматриваемая модель соответствует стандарту IEEE 802.11s, то время будет величиной дискретной и минимальной базовой единицей времени, будет считаться «слот». Сам процесс передачи кадров Beacon frame может быть представлен в виде последовательности виртуальных слотов (они могут быть переменной длины), которая начинается в каждый момент ожидаемого времени передачи Beacon (Target Beacon Transmission Time, TBTT).

На скорости передачи по беспроводным каналам влияют особенности распространения электромагнитных волн в пространстве [9-12].

Последовательные моменты ожидаемого времени передачи кадра Beacon разделены друг от друга заданными одинаковыми промежутками времени – Beacon-интервалами (Рисунок 1).

Существует несколько возможных алгоритмов рассылки кадров Beacon frame в беспроводных ячеистых сетях, соответствующих стандарту IEEE 802.11s. Самый простой из них состоит в использовании метода множественного доступа к каналу с контролем несущей и предотвращением коллизий (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance - CSMA/CA), аналогично процессу передачи данных. Но в этом случае с увеличением числа mesh-узлов в беспроводной сети и увеличении потока передаваемых данных вероятность возникновения коллизий кадров

Beacon frame друг с другом и с другими кадрами при передаче очень быстро возрастает.

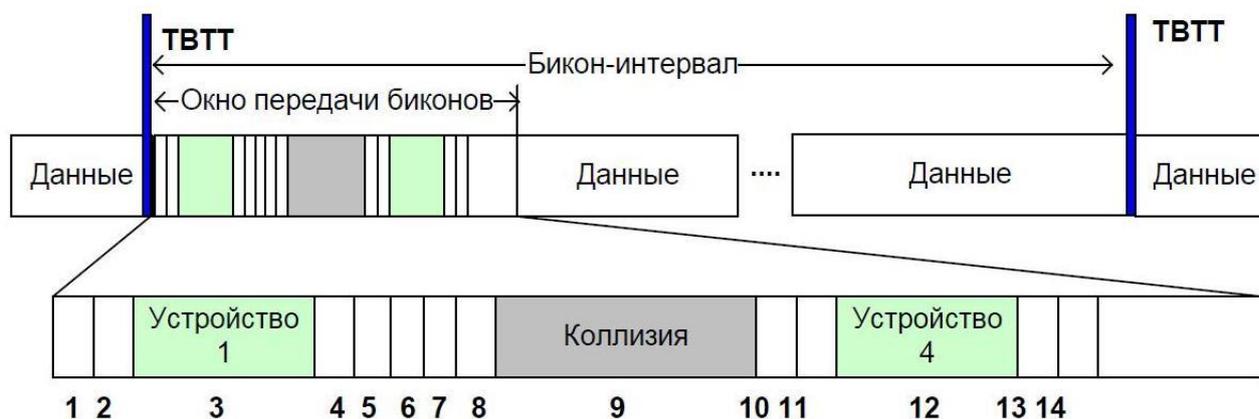


Рисунок 1 – Последовательность виртуальных слотов

Передающий mesh-узел не имеет возможности проверить, был ли кадр Beacon frame передан удачно или произошла коллизия, так как они, в отличие от кадров данных, являются широковещательными кадрами, и их получение не подтверждается. То есть, повторная передача кадра Beacon frame в случае коллизии невозможна. Это означает, что если беспроводной mesh-узел послал Beacon frame и он попал в коллизию с другим кадром Beacon frame или в общем случае, с любым другим кадром, то информация от этого узла ячеистой сети не будет доступна другим участникам mesh-сети в течение, по крайней мере, одного Beacon-интервала.

Закономерности передачи информации в компьютерной сети определяются соответствующими алгоритмами [13-15].

В достаточно большой беспроводной ячеистой сети с активным трафиком данных между mesh-узлами возможность возникновения повторных (т.е. подряд в течение нескольких соседних Beacon-интервалов) коллизий кадров Beacon frame для конкретного mesh-узла достигает настолько большой величины, что возникает угроза потери синхронизации всей беспроводной mesh-сети. Для того чтобы исключить возможность возникновения коллизии кадров Beacon frame с кадрами других типов, в беспроводных сетях стандарта IEEE 802.11s для рассылки Beacon frame было выделено специальное временное «окно», которое будет повторяться в каждый Beacon-интервал. В течение его передача любых других кадров данных невозможна. В самом начале каждого Beacon-интервала все узлы беспроводной mesh-сети будут соревноваться за право передать свой кадр Beacon frame в специальном окне, при этом происходит инициализация специального таймера обратного отсчета задержки.

Существуют два возможных способа инициализации самого таймера и обратного отсчета таймера для передачи кадра Beacon frame:

- *Алгоритм без прослушивания.* Величина задержки будет выбираться с одинаковой вероятностью из окна передачи Beacon frame и начинает отсчитываться без учёта занятости канала: значение таймера обратного отсчета будет уменьшаться на одну единицу всякий раз как заканчивается текущий временной слот. После того, как время задержки закончится и канал передачи будет свободен, беспроводной mesh-узел будет начинать передачу своего кадра Beacon frame, в противном случае, если канал не свободен, т.е. передачу ведет другое беспроводное устройство, происходит отмена передачи.

- *Алгоритм с прослушиванием.* Величина задержки будет выбираться с одинаковой вероятностью из конкурентного окна, и её отсчёт будет происходить аналогично, как и при передаче кадров с данными. В случае занятости среды передачи в течение одного слота, все узлы беспроводной mesh-сети уменьшают величину своих таймеров на одну единицу. Если же, хотя бы один из mesh-узлов начнёт свою передачу то, остальные беспроводные узлы останавливают свои собственные таймеры на всё время передачи и добавляют дополнительно интервал времени Distributed InterFrame Space (DIFS). Если же произошла коллизия, то вместо интервала Distributed InterFrame Space используется более длинный интервал Extended Inter Frame Spacing (EIFS). Когда заданный интервал времени заканчивается, беспроводной mesh-узел может начинать передавать свой кадр Beacon frame.

Далее будем более подробно рассматривать вариант алгоритма с прослушиванием. В любой момент ожидаемого времени передачи Beacon возможна передача так называемого АТИМ-окна (Announcement Traffic Indication Message – сообщение уведомления о трафике), во время которого могут быть пересланы только Beacon frame или сами АТИМ-кадры (этот механизм используется для энергосбережения). И необходимо отметить, что в это время передача пакетов иных видов запрещена в целях уменьшения вероятности возникновения коллизии.

Эта последовательность виртуальных слотов содержит максимально  $P$  слотов, а общая длина всех виртуальных слотов не может превышать размер Announcement Traffic Indication Message -окна.

Если за время одного виртуального слота ни один из беспроводных узлов ячеистой сети не начнёт передачу своего кадра Beacon, то общая длина такого виртуального слота  $t_s$  будет равна длительности одной базовой единице времени, то есть одного слота. Если же единственный беспроводной узел mesh-сети будет передавать Beacon frame в самом начале виртуального слота, то длина его (этого виртуального слота) составит сумму времени передачи кадра Beacon frame плюс межкадровый

временной промежуток Distributed InterFrame Space (DIFS) , в течение которого узел - отправитель прослушивает сеть, чтобы избежать коллизий.

В случае если несколько беспроводных mesh-узлов одновременно начинают передачи своих Beacon frame в начале виртуального слота, то происходит коллизия кадров Beacon, и тогда общая длина всего виртуального слота  $t_c$  будет равна сумме времени передачи Beacon frame плюс более продолжительный расширенный межкадровый интервал Extended Inter Frame Spacing (EIFS). Рассматриваемая аналитическая модель дает возможность подсчитать среднее количество кадров Beacon frame, передача, которых может быть успешно завершена за Beacon-интервал –  $W(N, P, C)$ ,

где  $N$  – количество mesh-узлов в беспроводной сети,

$P$  – Максимальное количество виртуальных слотов в Announcement Traffic Indication Message -окне,

$C$  – величина Announcement Traffic Indication Message -окна в базовых единицах времени (слотах).

Не вызывает сомнения тот факт, что

$W(1, P, C) = 1$ , для всех  $C \geq P \geq 1$ , и

$W(N, 1, C) = 0$  , если  $N > 1$  и  $C \geq 1$ .

Все mesh-узлы беспроводной ячеистой сети на равных правах будут состязаться за право передачи именно своего Beacon frame, используя один и тот же одинаковый алгоритм. И математическая вероятность того, что именно конкретный mesh-узел беспроводной сети успешно передаст в эфир свой кадр Beacon frame за время Beacon- интервала, может быть найдена по следующей формуле:

$$b = \frac{W(N,P,C)}{N}. \quad (1)$$

Рассмотрим подробнее непосредственно сам процесс передачи Beacon frame, описывая поступательно каждый из виртуальных слот и подсчитывая количество беспроводных узлов mesh-сети, которые начинают в нем передачу своих Beacon frame. Предположим, что в момент начала текущего виртуального слота  $m$  беспроводных узлов mesh-сети ещё не передавали свои Beacon frame кадры,  $j$  виртуальных слотов остались нерассмотренными, и в Announcement Traffic Indication Message - окне осталось  $h$  слотов. Математическая вероятность того, что ровно  $y$  из  $m$  беспроводных mesh-узлов начнут передачу своего собственного Beacon frame в текущем виртуальном слоте будет равна:

$$b(y, m, j) = C_y^m * j^y * (1 - \frac{1}{j})^{m-y}, \quad (2)$$

$$\text{где } C_y^m = \frac{m!}{y!(m-y)!}, \quad (3)$$

представляет число возможных комбинаций выбора  $y$  из  $m$  узлов беспроводной mesh-сети.

Beacon frame будет считаться успешно переданным только в том случае, когда единственный беспроводной mesh-узел начал передачу своего кадра Beacon в текущем виртуальном слоте. Математическая вероятность возникновения такого события -  $b(1, m, j)$ .

Математическая вероятность ситуации, что ни один из узлов беспроводной mesh-сети не собирается пытаться передавать свой Beacon frame во время текущего виртуального слота -  $b(0, m, j)$ .

Далее, мы будем рассматривать последовательно  $P$  виртуальных слотов друг за другом, и попытаемся подсчитать количество успешно переданных кадров Beacon frame  $W(N, P, C)$  через рекурсию:

$$\begin{aligned} W(m, j, h) = & b(0, m, j) * 1(j > 1 \ \& \ h > 1) * W(m, j - 1, h - 1) + \\ & + b(1, m, j) * \{1 + 1(h > t_s \ \& \ j > 1) * W(m - 1, j - 1, h - t_s)\} + \\ & + \sum_{y=2}^m b(y, m, j) [1(h > t_c \ \& \ j > 1) * W(m - y, j - 1, h - t_c)]. \quad (4) \end{aligned}$$

Здесь, логическая “1” (“Условие”) – это так называемая функция-индикатор. Она принимает значение “1”, если “Условие” выполняется и значение “0”, если “Условие” не выполняется.

В данной формуле первое из трех слагаемых определяется случаем, когда текущий виртуальный слот абсолютно пустой. Пока, в рассматриваемой модели, находится хотя бы еще один нерассмотренный виртуальный слот (т.е. при  $j > 1$ ) и еще, по крайней мере, один слот в оставшейся части Announcement Traffic Indication Message -окна (т.е. при  $h > 1$ ), то с математической вероятностью  $b(0, m, j)$  к  $W$  будет прибавляться среднее число успешно переданных кадров Beacon frame в остальной части Announcement Traffic Indication Message -окна.

Второе слагаемое описывает случай, когда только один беспроводной mesh-узел транслирует свой Beacon frame в текущем виртуальном слоте. При этом математическая вероятность этого события  $b(1, m, j)$ . Затем к  $W$  прибавляется еще один успешно переданный кадр Beacon frame. Далее выполняется проверка, что конец Announcement Traffic Indication Message -окна ещё не достигнут (т.е. выполняется условие  $h > t_s$ ) и дополнительно, что имеется хотя бы один нерассмотренный виртуальный слот (т.е. при условии  $k > 1$ ). Если условия выполнены, тогда

число узлов беспроводной mesh-сети  $m$  уменьшается на 1, а остаток Announcement Traffic Indication Message -окна уменьшается на величину  $t_s$ .

И наконец, последнее слагаемое описывает случай коллизии кадров Beacon frame, т.е. когда  $y = \{2, \dots, m\}$  mesh-узлов одновременно пытаются передать свои Beacon frame в текущем виртуальном слоте. Математическая вероятность такого события равна  $b(y, m, j)$ . Затем производится проверка, что Announcement Traffic Indication Message -окно ещё не закончилось (т.е. при условии  $h > t_s$ ), и дополнительно, что присутствует ещё хотя бы один нерассмотренный виртуальный слот (т.е. выполняется условие  $j > 1$ ). В этом случае число узлов беспроводной mesh-сети  $m$  уменьшается на величину  $y$ , а значение Announcement Traffic Indication Message -окна уменьшается на  $t_s$ . И затем начинается переход к новому шагу рекурсии. Условием завершения процесса рекурсии является одно из следующих событий: когда продолжительность временного интервала Announcement Traffic Indication Message - окно оканчивается или будут рассмотрены все виртуальные слоты.

Напомним, что по итогам расчёта построенной аналитической модели мы получим зависимость вероятности удачной передачи синхронизирующих кадров Beacon frame в беспроводной ячеистой сети стандарта IEEE 801.11s от количества mesh-узлов в сети и величины временного интервала, предназначенного для передачи этих синхрокадров. Для получения численных результатов рассматриваемого моделирования может быть использована практически любая из следующих программ: Mathcad фирмы Parametric Technology Corporation, MATLAB фирмы The MathWorks, SMáth Stúdio от Андрея Ивашова, Mathematica компании Wolfram Research или любой язык высокого уровня типа VisualBasic и т.п. Значения статических входных параметров, использованных, при расчете приведены в Таблице 2.

Таблица 2 – Численные значения статических входных параметров моделирования

1	Длительность виртуального слота, aSlotTime	9 мкс
2	$aCW_{min}$	15 слотов
3	$P=1+2*aCW_{min}$	31 слотов
4	Минимальная базовая скорость соединения	6,5 Мбит/с
5	Длина полезной части Beacon frame	107 байт
6	Длительность Distributed InterFrame Space (DIFS)	34 мкс
7	Длительность Extended Inter Frame Spacing (EIFS)	94 мкс
8	Длительность $t_s$	247 мкс
9	Длительность $t_c$	307 мкс
10	Длительность $t_s$	27 слотов
11	Длительность $t_c$	34 слота

Полученные результаты расчетов указывают на то, что количество удачных передач кадров Beacon frame увеличивается до тех пор, пока количество узлов беспроводной ячеистой сети достаточно мало и каждому mesh-узлу удается транслировать собственный Beacon frame кадр практически в каждом Beacon-интервале (Рисунок 2). Далее, при увеличении общего количество узлов в беспроводной mesh-сети до определенного значения, которое находится в прямой зависимости от размера Announcement Traffic Indication Message-окна, количество удачных передач сильно уменьшается, поскольку вероятность коллизии кадров Beacon frame начинает очень быстро возрастать.

Передающие устройства в радиоканалах могут быть спроектированы на основе соответствующих подходов [16, 17].

Численные значения вариативных входных параметров, использованных, при расчете приведены в Таблице 3.

Таблица 3 – Численные значения вариативных входных параметров моделирования

1	Длина Announcement Traffic Indication Message –окна C	от 50 до 200 слотов
2	Количество узлов mesh-сети N	от 1 до 50 шт.

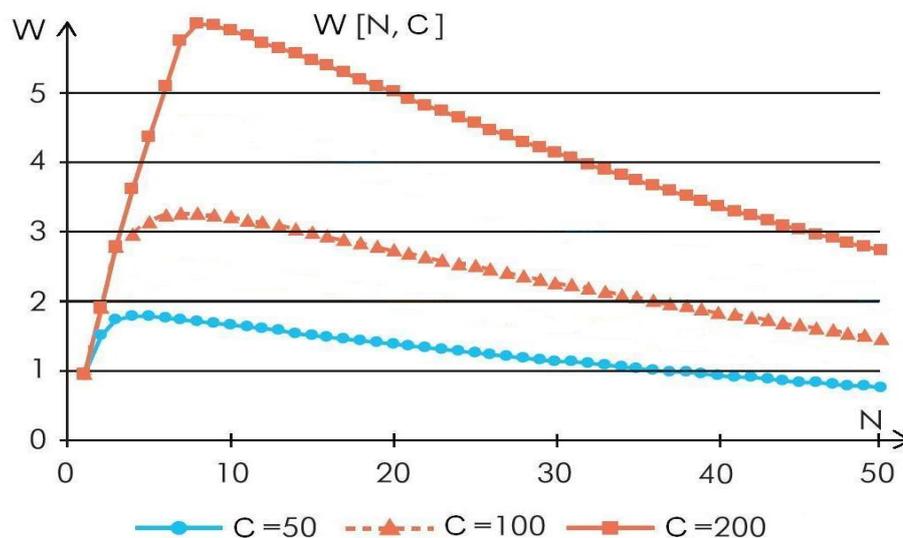


Рисунок 2 – Среднее число успешных передач кадров Beacon frame в зависимости от N - числа узлов беспроводной mesh-сети и C - размера Announcement Traffic Indication Message –окна.

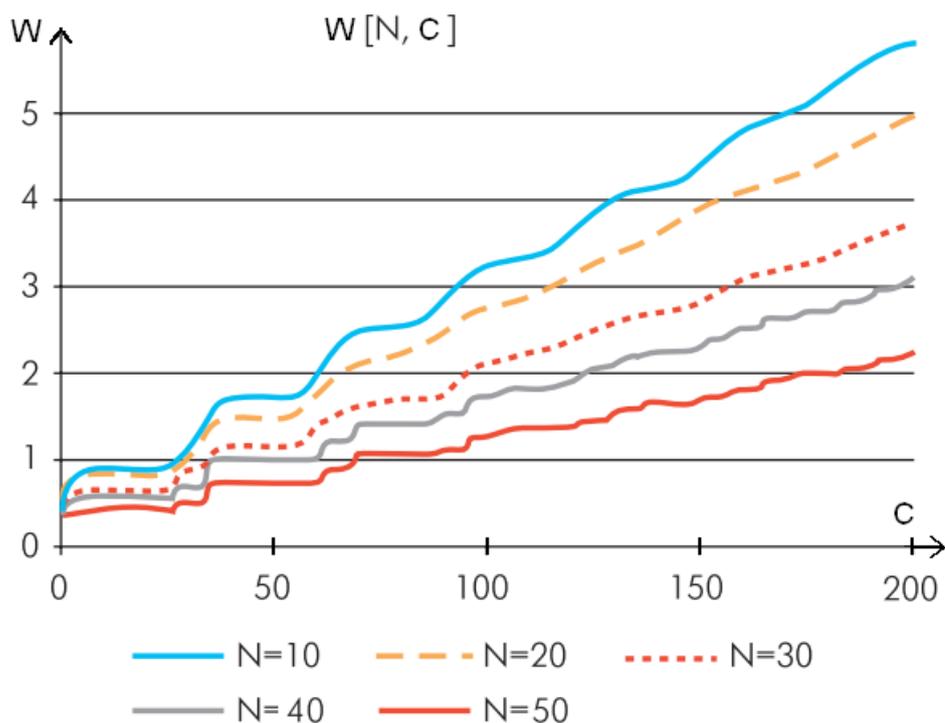


Рисунок 3 – Среднее количество успешных передач кадров Beacon frame за Beacon-интервал в зависимости от  $C$  - величины Announcement Traffic Indication Message -окна и  $N$  - количества узлов в беспроводной mesh-сети

В случае если беспроводная ячеистая сеть будет состоять из  $N$  узлов то, зависимость количества удачных передач кадра Beacon frame от величины Announcement Traffic Indication Message -окна (Рисунок 3) будет вырастать с определённым периодом. Из графика видно, что период увеличения приблизительно составляет продолжительность времени передачи кадра Beacon frame. Таким образом, можно сделать вывод, что любое увеличение продолжительности Announcement Traffic Indication Message -окна на величину, которая будет меньше определённой пороговой, в конечном итоге абсолютно не повлияет на увеличение вероятности успешной передачи кадра Beacon frame.

По полученным результатам расчёта построенной аналитической модели (Рисунок 2 и Рисунок 3) можно представить итоговую зависимость вероятности удачной передачи синхронизирующих кадров Beacon frame в беспроводной ячеистой сети стандарта IEEE 801.11s от количества mesh-узлов в сети и величины временного интервала, предназначенного для передачи этих синхрокадров (Рисунок 4). При действующих условиях полносвязной топологии mesh-сети и синхронных узлов.

Анализируя графики, можно сделать следующий вывод: вероятность удачной трансляции своего кадра Beacon frame каждым конкретным узлом беспроводной ячеистой сети состоит в прямой зависимости от общего

количества числа mesh-узлов, подключенных к беспроводной сети и самой величины Announcement Traffic Indication Message -окна (Рисунок 4). Причем эта вероятность будет медленно снижаться, падая до момента, когда в беспроводной ячеистой сети не станет некоторое определенное количество mesh-устройств (т.е. до определённого размера mesh-сети), поскольку в этом случае вероятность коллизии кадров Beacon frame будет очень мала. В случае зафиксированного числа узлов в беспроводной mesh-сети возможность коллизии кадров Beacon frame будет зависеть только от количества виртуальных слотов, которое будет увеличиваться с ростом Announcement Traffic Indication Message -окна. А так как количество виртуальных слотов никогда не превысит  $P=1+2 \cdot aCW_{min}$ , то, начиная с определенного момента возможность удачной передачи кадра Beacon frame будет резко падать, поскольку количество коллизий кадров Beacon frame будет очень быстро расти. Отметим, что основным источником погрешности в рассматриваемой аналитической модели является процесс округления значений величин временных интервалов  $t_s$  и  $t_c$  до целого числа слотов.

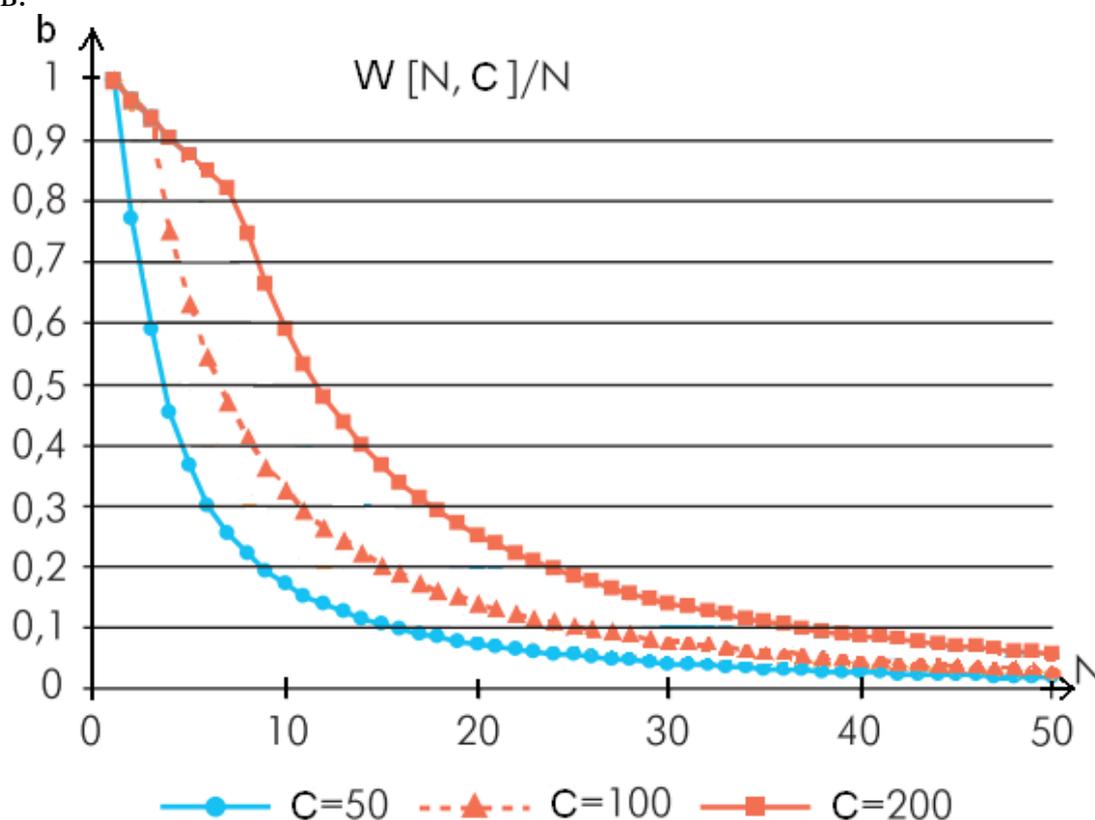


Рисунок 4 – Вероятность удачной трансляции кадра Beacon frame любым конкретным узлом беспроводной mesh-сети в зависимости от  $N$  –общего количества mesh-узлов в сети и  $C$  - величине Announcement Traffic Indication Message -окна

Как отмечалось ранее, в Announcement Traffic Indication Message - окне невозможна передача кадров, несущих полезный трафик, поэтому продолжительность Announcement Traffic Indication Message - окна должна быть минимально возможной. Однако, с другой стороны, в очень коротком Announcement Traffic Indication Message - окне вероятность возникновения коллизии кадров Beacon frame существенно возрастает. И наконец, можно сделать главный вывод всей работы: выбор оптимальной величины Announcement Traffic Indication Message – окна с учётом размера беспроводной ячеистой сети (т.е. общего количества узлов mesh-сети) позволяет прогнозировать успешную передачу синхронизирующих кадров Beacon frame каждого конкретного беспроводного mesh-узла в пределах заданной вероятности и с минимальными потерями на служебный трафик.

Практическая значимость полученных результатов состоит в том, что при проектировании и реализации беспроводной ячеистой сети стандарта IEEE 802.11s есть возможности корректировать параметры передачи синхронизирующих кадров в зависимости от количества mesh-устройств в сети и получения заданной вероятности выполненной доставки синхрокадров [18, 19]. При помощи построенной аналитической модели может быть разработан алгоритм настройки параметров механизма синхронизации, адаптивной к количеству сетевых устройств и требованиям других механизмов беспроводной ячеистой сети. Это в частности, позволяет построить беспроводную ячеистую сеть IEEE 802.11s с прогнозируемой эффективностью и ожидаемой пропускной способностью.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ермолова В.В. Архитектура системы обмена сообщений в немаршрутизируемой сети / В.В.Ермолова, Ю.П.Преображенский // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2010. № 7. С. 79-81.
2. Мишин Я.А. О системах автоматизированного проектирования в беспроводных сетях / Я.А.Мишин // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2013. № 10. С. 153-156.
3. <http://www.ieee802.org/15/>.
4. <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.11F-2003.pdf>.
5. <http://standards.ieee.org/about/get/802/802.11.html>.
6. Львович И.Я. Исследование устойчивости беспроводных сетей в условиях блокирования сигнала / И.Я.Львович, О.Н.Чопоров, А.П.Преображенский, В.Б.Щербаков // Информация и безопасность. 2016. Т. 19. № 2. С. 254-257.
7. Авдеев В.Б. Моделирование малогабаритных сверхширокополосных антенн / В.Б.Авдеев, А.В.Ашихмин, А.В.Бердышев, С.В.Корочин,

- В.М.Некрылов, А.В.Останков, Ю.Г.Пастернак, И.В.Попов, А.П.Преображенский // Под редакцией: В.Б. Авдеева, А.В. Ашихмина. Воронеж, Издательство: Воронежский государственный университет, 2005, 223 с.
8. Preobrazhensky A.P. The features of the calculation of scattered electromagnetic fields and design of electrodynamic objects / A.P.Preobrazhensky // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2016. № 2 (17). С. 33-35.
  9. Lvovich Ya. Modeling of scattering of electromagnetic waves on the base of multialternative optimization / Ya.Lvovich, A.Preobrazhensky, O.Choporov // Information Technology Applications. 2016. № 1. С. 117-125.
  10. Сазонова С.А. Оценка надежности работы сетевых объектов / С.А.Сазонова // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2016. № 1 (16). С. 40-42.
  11. Максимова А.А. Методы исследования характеристик рассеяния электромагнитных волн объектами / А.А.Максимова, А.Г.Юрочкин // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2016. № 1 (16). С. 53-56.
  12. Канавин С.В. Перспективы применения систем мобильного широкополосного доступа в сетях подвижной радиосвязи на основе стандартов MOBILE WIMAX и LTE / С.В.Канавин, А.С.Лукьянов // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2016. № 1 (16). С. 79-82.
  13. Паневин Р.Ю. Реализация транслятора имитационно-семантического моделирования / Р.Ю.Паневин, Ю.П.Преображенский // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2009. № 5. С. 057-060.
  14. Головинов С.О. Проблемы управления системами мобильной связи / С.О. Головинов, А.А.Хромых // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2012. № 9. С. 13-14.
  15. Ерасов С.В. Проблемы электромагнитной совместимости при построении беспроводных систем связи / С.В.Ерасов // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2013. № 10. С. 137-143.
  16. Преображенский А.П. Прогнозирование характеристик металлодиэлектрической антенны / А.П.Преображенский, О.Н.Чопоров // В мире научных открытий. 2016. № 11 (83). С. 135-141.
  17. Львович И.Я. Разработка принципов построения САПР дифракционных структур и радиолокационных антенн / И.Я.Львович, А.П.Преображенский // Вестник Воронежского

государственного технического университета. 2006. Т. 2. № 12. С. 125-127.

18. Вялова Е.П. Адаптивный алгоритм маршрутизации в компьютерной сети / Е.П.Вялова // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2016. № 2 (17). С. 97-100.
19. Львович И.Я. Факторы угрозы экономической безопасности государства / И.Я.Львович, А.А.Воронов, Ю.П.Преображенский // Информация и безопасность. 2006. Т. 9. № 1. С. 36-39.

A.A.Zhilina, M.A.Druzhinin

## THE ANALYTICAL MODEL OF THE TRANSMISSION OF THE SYNC FRAME BEACON FRAME IN THE WIRELESS MESH NETWORKING STANDARD IEEE 802.11 S

*Russian new university*

*Voronezh Institute of High Technologies*

*The paper solves several problems: a study of the principles of wireless cellular networks; the analysis of the characteristics of the implementation of the synchronization in wireless mesh networks IEEE 802.11 s; held to develop the analytical model of the mechanism of transmission of the sync frame Beacon frame to the network full-mesh topology. In the design and implementation of a wireless mesh network IEEE 802.11 s opportunities to correct the transfer settings for synchronization of frames depending on the number of mesh devices in the network and obtain the specified probability of completed delivery of synchroindnow. It is possible to form a wireless mesh network IEEE 802.11 s with the predicted efficiency and expected throughput.*

**Keywords:** model, wireless network, radio wave propagation, synchronization.

### REFERENCES

1. Ermolova V.V. Arkhitektura sistemy obmena soobshcheniy v nemarshrutiziruемой seti / V.V.Ermolova, Yu.P.Preobrazhenskiy // Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologiy. 2010. No. 7. pp.79-81.
2. Mishin Ya.A. O sistemakh avtomatizirovannogo proektirovaniya v besprovodnykh setyakh / Ya.A.Mishin // Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologiy. 2013. No. 10. pp.153-156.
3. <http://www.ieee802.org/15/>.
4. <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.11F-2003.pdf>.
5. <http://standards.ieee.org/about/get/802/802.11.html>.
6. L'vovich I.Ya. Issledovanie ustoychivosti besprovodnykh setey v usloviyakh blokirovaniya signala / I.Ya.L'vovich, O.N.Choporov, A.P.Preobrazhenskiy, V.B.Shcherbakov // Informatsiya i bezopasnost'. 2016. Vol. 19. No. 2. pp.254-257.
7. Avdeev V.B. Modelirovanie malogabaritnykh sverkhshirokopolosnykh antenn / V.B.Avdeev, A.V.Ashikhmin, A.V.Berdyshev, S.V.Korochin,

- V.M.Nekrylov, A.V.Ostankov, Yu.G.Pasternak, I.V.Popov, A.P.Preobrazhenskiy // Pod redaktsiyey: V.B. Avdeeva, A.V. Ashikhmina. Voronezh, Izdatel'stvo: Voronezhskiy gosudarstvennyy universitet, 2005, 223 p.
8. Preobrazhenskiy A.P. The features of the calculation of scattered electromagnetic fields and design of electrodynamic objects / A.P.Preobrazhenskiy // Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologiy. 2016. No. 2 (17). pp.33-35.
  9. Lvovich Ya. Modeling of scattering of electromagnetic waves on the base of multialternative optimization / Ya.Lvovich, A.Preobrazhenskiy, O.Choporov // Information Technology Applications. 2016. No. 1. pp.117-125.
  10. Sazonova S.A. Otsenka nadezhnosti raboty setevykh ob"ektov / S.A.Sazonova // Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologiy. 2016. No. 1 (16). pp.40-42.
  11. Maksimova A.A. Metody issledovaniya kharakteristik rasseyaniya elektromagnitnykh voln ob"ektami / A.A.Maksimova, A.G.Yurochkin // Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologiy. 2016. No. 1 (16). pp.53-56.
  12. Kanavin S.V. Perspektivy primeneniya sistem mobil'nogo shirokopolosnogo dostupa v setyakh podvizhnoy radiosvyazi na osnove standartov MOBILE WIMAX i LTE / S.V.Kanavin, A.S.Luk'yanov // Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologiy. 2016. No. 1 (16). pp.79-82.
  13. Panevin R.Yu. Realizatsiya translyatora imitatsionno-semanticheskogo modelirovaniya / R.Yu.Panevin, Yu.P.Preobrazhenskiy // Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologiy. 2009. No. 5. pp.057-060.
  14. Golovinov S.O. Problemy upravleniya sistemami mobil'noy svyazi
  15. S.O. Golovinov, A.A.Khromykh // Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologiy. 2012. No. 9. pp.13-14.
  16. Erasov S.V. Problemy elektromagnitnoy sovместимости pri postroenii besprovodnykh sistem svyazi / S.V.Erasov // Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologiy. 2013. No. 10. pp.137-143.
  17. Preobrazhenskiy A.P. Prognozirovaniye kharakteristik metallodielektricheskoy anteny / A.P.Preobrazhenskiy, O.N.Choporov // V mire nauchnykh otkrytiy. 2016. No. 11 (83). pp.135-141.
  18. L'vovich I.Ya. Razrabotka printsipov postroeniya SAPR difraktsionnykh struktur i radiolokatsionnykh antenn / I.Ya.L'vovich, A.P.Preobrazhenskiy // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2006. Vol. 2. No. 12. pp.125-127.

19. Vyalova E.P. Adaptivnyy algoritm marshrutizatsii v komp'yuternoy seti / E.P.Vyalova // Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologiy. 2016. No. 2 (17). pp.97-100.
20. L'vovich I.Ya. Faktory ugrozy ekonomicheskoy bezopasnosti gosudarstva / I.Ya.L'vovich, A.A.Voronov, Yu.P.Preobrazhenskiy // Informatsiya i bezopasnost'. 2006. Vol. 9. No. 1. pp.36-39.