

МОДЕЛЬ КАНАЛА OFDM В ЗАДАЧЕ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ СЕТИ IEEE 802.11*Викулов А.С., Парамонов А.И.**Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций
им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, РФ**E-mail: asv012016@gmail.com*

В данной статье рассмотрены вопросы обеспечения эффективности функционирования сети стандарта IEEE 802.11. Предложена модель канала OFDM, связывающая его основные параметры с условиями применения. За основной критерий принята длительность передачи кадра с полезными данными. Рассмотрен случай, когда уровень приема сигнала от точки доступа является стабильно высоким на всей площади целевой ячейки покрытия беспроводной сети и, как следствие, не может сам по себе быть ключевым параметром, определяющим номинальную скорость передачи данных. В рамках рассмотрения этой задачи получены аналитические модели для количества бит в символе и времени передачи кадра как функции от отношения «сигнал/шум» для стандарта IEEE 802.11ac. Предложенные аналитические модели могут быть использованы для расчетов режимов работы, оценки эффективности сети в условиях соблюдения типичных для настоящего времени требований уровня приема сигнала, устанавливаемых современными корпоративными стандартами.

Ключевые слова: беспроводная сеть доступа, IEEE 802.11ac, отношение «сигнал/шум», эффективность, схема модуляции и кодирования, время передачи кадра

Введение

К настоящему времени, беспроводные вычислительные локальные сети (БЛВС) стандартов группы IEEE 802.11 уже получили широчайшее распространение, однако, интерес к ним не только не снижается, но и значительно возрастает. БЛВС стали составной частью гетерогенной сети связи. Этому способствует рост числа пользовательских устройств, поддерживающих эти стандарты, при устойчивом увеличении требований к пропускной способности. Это ведет к заметному повышению сложности планирования современных сетей стандарта 802.11. Современные БЛВС работают в условиях высокой плотности клиентских устройств, что создает дополнительные сложности планирования.

Тенденции развития инфокоммуникационной системы выражаются, в частности, в таких концепциях, как построение Интернета вещей (ИВ) и Тактильного интернета (ТИ). Концепция ТИ направлена на рост роли интерактивных услуг, требующих высокого качества обслуживания трафика, в частности, малых задержек доставки данных. Сети доступа часто являются «узким» звеном маршрута, определяющим задержку доставки. С учетом требований к задержке, следует ожидать и повышение требований к БЛВС.

При планировании сети проектировщик часто сталкивается с отсутствием ясных методик оценки эффективной скорости передачи. Это осложняется отсутствием как данных радиообследования, так и ограниченностью возможно-

стей стационарного (независящего от времени) моделирования радиопокрытия у большинства специализированных программных продуктов. При этом требования корпоративных сетей в большинстве случаев являются гораздо более высокими, чем для решения типовых задач беспроводных сетей доступа. Это в первую очередь касается таких базовых требований к радиопокрытию, как уровень принимаемого сигнала на целевой площади, условие хэндовера клиента между точками доступа (ТД), число доступных ТД того же канала и т.п. Сейчас БЛВС строятся в условиях не только высокой абонентской плотности, но и в условиях географической близости к сетям аналогичного назначения.

Плотность их размещения в условиях города такова, что практически в любой точке городской территории можно зарегистрировать сигналы нескольких ТД. Таким образом, сети работают в условиях значительной интерференции, которую также следует учитывать при планировании. Помимо этого, в значительной степени на работу БЛВС влияют характеристики пользовательского трафика. Они зависят от набора приложений (сервисов), предоставляемых в БЛВС и влияют как на качество обслуживания трафика сетью, так и на интерференцию как с точками доступа своей, так и соседних БЛВС.

Для решения задач планирования необходимо иметь применимую на практике методику оценки эффективности использования точкой доступа канала OFDM. Для этого требуется иметь модель такого канала, позволяющую

учесть максимум влияющих на качество обслуживания трафика факторов.

Постановка задачи

С точки зрения моделирования канального уровня в сетях стандарта версии 802.11b/g первое аналитическое описание работы канального уровня, определяемого распределенной координационной функцией (DCF) для режима ad-hoc, было сделано в основополагающей работе Giuseppe Bianchi [1]. Упомянутая модель, как и множество работ, посвященных развитию этого подхода, основана на вероятностных методах цепей Маркова. Позже появилось немало предложений по уточнению этой модели и ее применению для различных случаев работы БЛВС. В них авторы рассматривают, в частности, сочетание unicast и broadcast трафика [2], эффект захвата эфира на физическом уровне [3], и др. Суть методов заключается в оценке вероятности занятости среды распространения с позиции его использования заданным числом станций путем аналитического моделирования соответствующей функции. Обзор аналитических подходов сделан в работе [4]. Среди факторов, влияющих на производительность, авторы работы рассматривают наличие помех типа «белый шум», наличие эффекта «захвата» на канальном уровне, наличие коррелированных сбоев, насыщенный или ненасыщенный режим работы и др.

Стандарты IEEE 802.11 предполагают наличие механизма адаптации параметров передачи (модуляции и кодирования данных) в зависимости от конкретных условий, которая осуществляется выбором соответствующей схемы модуляции и кодирования (MCS). Поэтому в модели следует учесть влияние этого механизма на функционирование канала в различных условиях работы.

Выбор MCS принципиально возможен двумя различными способами [5]. Первый из них основан на статистической оценке коэффициента потерь кадров. Для адаптации режима работы, в качестве показателя качества канала выбирается число или доля потерянных кадров. В случае превышения допустимой величины потерь в канале, система выбирает более низкий индекс MCS. И наоборот, если потери ниже определенного значения, производится попытка повысить индекс MCS. Алгоритмы статистической адаптации скорости передачи были впервые предложены в [6-7], после чего было предложено множество вариантов улучшения данного подхода. Данная группа методов получила наибольшее распространение, их обзор приведен в работе [5].

Второй способ выбора MCS основан на информации о соотношении уровня принимаемого сигнала и шума (помехи), которое влияет на качество канала, определяемое вероятностью потерь кадров. В [8-9] приводится анализ зависимости вероятности потерь кадров в канале от значения SNR. Подобные теоретические подходы предполагают, что при получении кадра устройство измеряет значение SNR и немедленно определяет MCS для последующей активной передачи. Данный подход реализован в алгоритме, описанном в работе [10].

В [11-12] была описана модель, выражающая пропускную способность ячейки БЛВС как функцию от уровня принимаемого сигнала. В частности, за отправную точку выбрана зависимость скорости передачи данных от уровня принимаемого сигнала, приведенная в стандарте [13]. Такой подход применим в рамках выбранной в [11-12] модели сервиса (трансляция видеопотока с БПЛА) ввиду: сравнительно больших расстояний между ТД и пользователями (до 500 м и более); относительно большой площади, покрываемой одной ТД; относительно невысоких требований к покрытию. Вследствие этого, в упомянутой модели основной рабочий диапазон уровней приема находится между -60 и -80 дБм.

На практике построения корпоративных сетей радиус ячейки БЛВС, размещенной внутри здания, значительно меньше (обычно в пределах 20 - 25 м), а уровень приема сигнала основной ТД со значением в пределах от -60 до -65 дБм обычно является обязательным. Таким образом, зависимость MCS от уровня принимаемого сигнала, с учетом упомянутых требований, вырождается в константу и, следовательно, уровень принимаемого сигнала не может сам по себе определять тип MCS. В таком случае, определяющим параметром, влияющим на режим работы БЛВС, является соотношение «сигнал/шум» (далее SNR).

Следует отметить, что известные модели не учитывают детально процессов, происходящих на уровне передачи отдельных кадров и эффектов, связанных с их обработкой. Другой особенностью существующих подходов является рассмотрение канала передачи как решающего устройства. В данном случае предполагается построение такой модели канала OFDM, которая позволила бы получить вероятностные характеристики канала с целью поиска оптимального режима работы.

Выберем целью построения модели оценку длительности передачи кадра с данными как

функцию от текущих условий работы и параметров передаваемого трафика.

Модель канала

Для OFDM канала минимальные пороговые для соответствующих индексов MCS значения SNR приведены в стандарте [13]. Однако, в документации на конкретное оборудование нередко эти значения несколько отличаются в большую сторону от приводимых в стандарте, например, [14; 19] ввиду различной внутренней логики реализации MRC, различных антенных конфигураций в режимах MIMO и др. [15].

Ряд работ, в частности [16-18], приводят типовую зависимость индекса MCS от SNR с незначительными отличиями в абсолютных значениях. Тем не менее, форма зависимости индекса MCS от SNR для одного выбранного режима в заданных условиях будет одна и та же. Так, например, в работах признанных экспертов-практиков [16-17] приведены данные, основанные на большом практическом опыте работы с разнообразным оборудованием. Эти данные ценны тем, что обобщают практические реализации алгоритмов выбора индекса MCS, поэтому мы, осознавая важность стандарта [13], будем использовать пороговые значения SNR , приведенные в [15-16]. В таблице 1 приведены оба ряда указанных значений.

Ниже опишем стационарную (не зависящую от времени) модель, дающую возможность построить функциональную зависимость между временем передачи полезной информации и величиной SNR . Допустим, что:

- антенны ТД и приемника обладают круговой диаграммой направленности;
- основная ТД всегда доступна для клиента с уровнем приема равным -60 дБм и лучше (больше);
- режимы MIMO не используются, поэтому расчеты ведем без учета MRC.

Исходя из логики функционирования системы управления каналом и стандарта IEEE 802.11, зависимость скорости передачи от SNR можно описать как дискретную функцию от непрерывной переменной. Однако часто в задачах анализа удобно заменить ее на близкую непрерывную функцию. Такое допущение дает возможность избежать усложнения задач анализа и оптимизации. Построим аппроксимацию зависимости между параметром, характеризующим выбранную MCS, и уровнем SNR на входе приемника в виде непрерывной функции. Поскольку мы сделали допущение, что уровень приема сигнала

основной ТД в рассматриваемой ячейке БЛВС не ниже -60 дБм, зависимостью от уровня сигнала можно пренебречь. Значение числа бит полезной информации на OFDM-символ N_{DBPS} имеет ту же форму зависимости от SNR , что и номинальные скорости передачи на соответствующей MCS, и в предлагаемой модели зависит только от SNR . Тем не менее, за характеристику выбранной MCS мы примем эту величину, поскольку именно она, как будет показано ниже, является определяющей при оценке времени передачи кадров с данными, что в свою очередь определяет эффективную скорость передачи полезной информации. Для практического расчета необходимо знать значение N_{DBPS} , определяемое выбранной MCS.

Отметим, что без аппроксимации функция $N_{DBPS}(SNR)$ для рассматриваемого случая имеет вид:

$$N_{DBPS}(SNR) = \begin{cases} N_{DBPS_i}, & SNR_{MIN_i} < SNR < SNR_{MAX_i}, \end{cases} \quad (1)$$

где i – номер индекса MCS, а SNR_{MIN_i} и SNR_{MAX_i} – соответственно минимальный и максимальный рекомендуемый уровень SNR для соответствующего индекса MCS.

Аппроксимируем эту зависимость непрерывной функцией вида

$$N_{DBPS}(SNR) = \begin{cases} 0; & SNR < 2; \\ N_{DBPS_MAX} \left(1 - \exp\left(-\frac{SNR^2}{2a^2}\right) \right); & SNR \geq 2. \end{cases} \quad (2)$$

Ступенчатая функция (1) аппроксимирована (2) гауссоидой согласно [20], которая отражает тенденцию изменения числа бит полезной информации, передаваемых в одном OFDM-символе при изменении соотношения «сигнал/шум». При этом SNR – соотношение «сигнал/шум», дБ; $N_{DBPS_MAX} = 312$ максимально возможное значение N_{DBPS} бит; a – полуширина кривой, дБ.

На рисунке 1 приведены обе зависимости (1) и (2) для дополнения стандарта IEEE 802.11ac [13] при работе в частотном канале HT20/VHT20 и защитном интервале, равном 400 нс (короткий защитный интервал). Аналогичные зависимости можно построить и для всех прочих исполнений стандарта (ERP, HT40/VHT40 и др.).

Таблица 1. Характеристики схем модуляции и кодирования

N_{DBPS} (бит)	# MCS	THPT (Mbps)	SNR [16-17]	SNR [13]
26	0	7,2	2	5
52	1	14,4	5	10
78	2	21,7	9	13
104	3	28,9	11	16
156	4	43,3	15	19
208	5	57,8	18	22
234	6	65	20	25
260	7	72,2	25	27
312	8	86,7	29	30

Далее определим длительность передачи полезной информации без учета эффектов агрегации кадров. Для этого рассчитаем длительность передачи кадра с данными на физическом уровне в VHT режиме (для стандарта 802.11ac).

Примем следующие допущения:

- передача производится в канале VHT20;
- MIMO не используется;
- режим SU;
- используется короткий защитный интервал GI продолжительностью 0,4 мкс;
- LDPC кодирование.

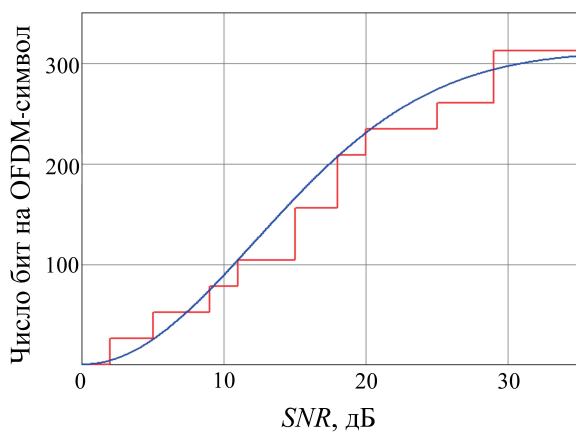


Рисунок 1. Ступенчатая зависимость $N_{DBPS}(SNR)$ с аппроксимацией

Следует отметить, что до ревизии 802.11n включительно ВСС-кодирование было либо единственным режимом (до 802.11n), либо режимом по умолчанию (в 802.11n). В дополнении стандарта 802.11ac режимом кодирования по умолчанию является LDPC при сохранении поддержки ВСС. Поэтому будем рассматривать вариант с LDPC кодированием.

Для расчета времени передачи кадра с данными в стандарте IEEE 802.11 [13] приводится формула

$$T_{DATA} = T_{LEG-PREAMBLE} + T_{L-SIG} + T_{VHT-SIG-A} + T_{VHT-PREAMBLE} + T_{VHT-SIG-B} + T_{SYML} T_{SYMS} N_{SYM} / T_{SYML}. \quad (3)$$

Для простоты дальнейшей записи обозначим длительность передачи преамбул физического уровня:

$$T_{PHY-PREAMBLES} = T_{LEG-PREAMBLE} + T_{L-SIG} + T_{VHT-SIG-A} + T_{VHT-PREAMBLE} + T_{VHT-SIG-B}.$$

С учетом этого (3) можно переписать как

$$T_{DATA} = T_{PHY-PREAMBLES} + T_{SYML} \left(\frac{T_{SYMS} N_{SYM}}{T_{SYML}} \right). \quad (4)$$

Число символов N_{SYM} для LDPC-кодирования, согласно [13], рассчитывается по формуле

$$N_{SYM} = m_{STBC} \left(\frac{8A + N_{Service}}{m_{STBC} N_{DBPS}} \right), \quad (5)$$

где A – размер MAC кадра, N_{DBPS} – число бит с данными на символ. Теперь, объединяя (4) и (5), получаем

$$T_{DATA} = T_{PHY-PREAMBLES} + T_{SYML} \left(\frac{T_{SYMS} m_{STBC}}{T_{SYML}} \left(\frac{8A + N_{Service}}{m_{STBC} N_{DBPS}} \right) \right). \quad (6)$$

Формула (6) связывает длительность передачи кадра с его размером и числом полезных бит нагрузки на OFDM-символ, то есть характеристикой выбранной MCS. Отметим, что в формуле (6) выражения в скобках округляются вверх до ближайшего целого числа.

Объединяя (2) и (6), получаем связь длительности передачи кадра с его размером и уровнем SNR. Оценим ошибку аппроксимации выражений (1) и (6) непрерывной моделью согласно (2). Для этого сравним зависимости $T_{DATA}(SNR)$ с ап-

проксимацией и без нее, после чего оценим пределы применимости полученной аппроксимации. При построении аппроксимации примем за размер кадра возможно большее значение, поскольку при этом зависимость от SNR будет наиболее явной. Примем $A = 1518$ байт и построим зависимости $T_{DATA}(SNR)$ для рассмотренного случая на рисунке 2.

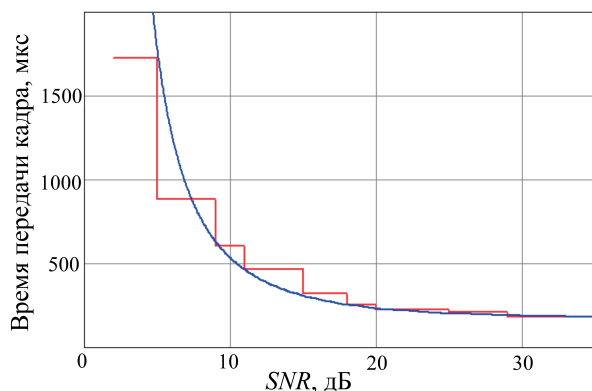


Рисунок 2. Ступенчатая зависимость $T_{DATA}(SNR)$ с аппроксимацией

Для рассмотренного ранее случая (см. рисунок 1) наилучшая аппроксимация ступенчатой функции (1) достигается при значении параметра равного $a = 12,18$. Из рисунка 2 видно, что аппроксимация (2) возможна при условии, что SNR составляет не менее 9 дБ. Что касается зоны особо низких значений $SNR < 9$, то здесь необходимо пользоваться исходным видом зависимости (1). Поэтому результирующую модель можно определить с учетом (1) и (2) как систему аналитических соотношений, представленную в таблице 2.

Таблица 2. Значения функции $N_{DBPS}(SNR)$

SNR	$N_{DBPS}(SNR)$
< 2	0
$2 \dots 5$	26
$5 \dots 9$	52
> 9	$N_{DBPS_MAX} = \left(1 - \exp\left(-\frac{SNR^2}{2a^2}\right) \right)$

На основе аппроксимированной модели, выбирая размер кадра, получаем зависимость длительности передачи одного кадра с полезными данными от значения SNR .

Для характеристики полученной модели построим зависимости ошибки аппроксимации длительности передачи для различных размеров кадра (А). При этом возьмем размеры кадра, при-

веденные в разделе 9.1 рекомендации RFC2544 [21]: 64; 128; 256; 512; 1024; 1280 и 1518 Байт.

Результаты приведены на рисунке 3, где видно, что при расчете длительности передачи отдельных кадров выбранное приближение применимо в широком диапазоне размеров кадра.

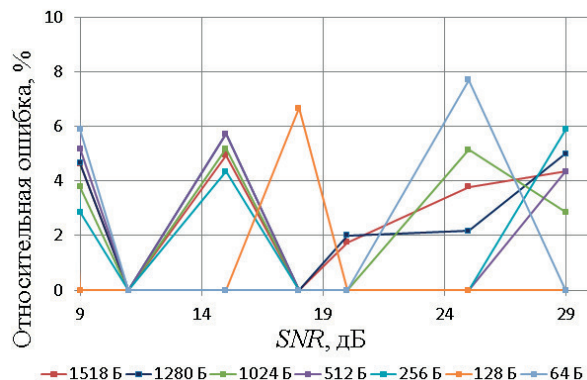


Рисунок 3. Относительная ошибка аппроксимации времени передачи для различных размеров кадра

Из рисунка 3 следует также, что предлагаемая модель применима в широком диапазоне значений SNR , кроме самых низких значений $SNR < 9$ дБ. Анализ ошибки, вносимой моделью (6), показал, что она не превышает 7,7% для всех размеров кадров, а для кадров размером больше 128 байт – не превышает 6%.

Следует заметить, что работа сети в условиях крайне низких SNR серьезно затруднена, так, например, в [22] отмечается, что на практике минимально допустимое значение SNR для демодулирования L-SIG преамбулы, передаваемой с модуляцией BPSK, составляет 4 дБ. В руководстве [14] также подчеркивается, что практическим пределом является 9-10 дБ. Поэтому для практических целей вполне применима модель, определяемая выражением (6) с аппроксимацией. Выражения из таблицы 2 могут быть использованы при разработке теоретических и имитационных моделей, когда необходимо обеспечить адекватное моделирование в широком диапазоне значений SNR .

Выводы

1. Развитие сетей связи стандарта 802.11 требует разработки методов планирования, которые обеспечивали бы получение адекватных результатов в условиях высокой плотности абонентов, интерференции от соседних сетей и высоких требований к качеству обслуживания трафика.

2. Для построения методов планирования БЛВС необходимо иметь модель OFDM-канала, адекватно отражающую зависимости параметров

канала от внешних условий функционирования. В качестве основного параметра канала следует рассматривать его пропускную способность (индекс MCS), а условия целесообразно описать соотношением «сигнал/шум» (помеха).

3. Предложенная модель описывает OFDM-канал связи с позиции длительности передачи кадра с данными. Модель выражает зависимость длительности передачи кадра от величины «сигнал/шум».

4. Анализ предложенной модели показал достаточную для практических целей точность. Относительная ошибка во всем диапазоне длин кадров не превышает 7,7%, а в большинстве случаев – не более 6%.

5. В дальнейшем предполагается исследование полученной аналитической зависимости для различных режимов работы канального уровня современных сетей стандарта IEEE 802.11.

Литература

1. Bianchi G. Performance Analysis of the IEEE 802.11 Distributed Coordination // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. – 2000. – Vol. 18. – PP. 535-548.
2. Oliveira R., Bernardo L., Pinto P. Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function with unicast and broadcast traffic // The 17th Annual IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC'06). – Helsinki. – 2006. doi: 10.1109/PIMRC.2006.254094.
3. Kochut A., Vasan A., Shankar A. e.a. Sniffing Out the Correct Physical Layer Capture Model in 802.11b // 12th IEEE International Conference on Network Protocols (ICNP 2004), – Berlin. – 2004. doi: 10.1109/ICNP.2004.1348115
4. Вишнеvский В.М., Ляхов А.И., Портной С.Л. и др. Широкополосные беспроводные сети передачи информации. М.: Техносфера, 2005. – 592 с.
5. Halperin D.C. Simplifying the Configuration of 802.11 Wireless Networks with Effective SNR. PhD dissertation. University of Washington. – 2012. – 179 p.
6. Kamerman A., Monteban L. WaveLAN: A high-performance wireless LAN for the unlicensed band // Bell Labs Technical Journal. – 1997. – №3(2). – P. 118-133. doi: 10.1002/bltj.2069
7. Lacage M., Manshaei M.H., Turletti T. IEEE 802.11 rate adaptation: A practical approach // In the Proceedings of the ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWIM. – Venice. – 2004. – P. 126-134.
8. Goldsmith A. Wireless Communications. Cambridge University Press. – 2005. – 427 p.
9. Давыдов А.В., Мальцев А.А. Сравнительный анализ методов детектирования сигналов в MIMO-OFDM-системах связи // Вестник ННГУ им. Н.И. Лобачевского. – 2005. – №1. – С. 80-86.
10. Holland G., Vaidya N., Bahl P. A rate-adaptive MAC protocol for multi-hop wireless networks // In the Proceedings of the ACM International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom). – Rome, July 16-21, 2001. – P. 236-251.
11. Paramonov A., Hussain O., Samouylov K. e.a. Clustering Optimization For Out-Of-Band D2D Communications // Wireless Communications and Mobile Computing. – Vol. 2017. – doi: 10.1155/2017/6747052.
12. Makolkina M., Vikulov A., Paramonov A. The augmented reality service provision in D2D network // Communications in Computer and Information Science. – 2017. – Vol. 700. – P. 281-290.
13. IEEE Std 802.11-2016. IEEE 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. – N-Y: Inst. IEEE. – 2016. – 3534 p.
14. Cisco Wireless Mesh Access Points, Design and Deployment Guide 8.0 Cisco Systems. – 2016. – 260 p.
15. Aruba 802.11ac In-depth White paper. Aruba Networks. – 2014. – 37 p.
16. Von Nagy A. Visualizing How Wi-Fi SNR Helps Determine the Achievable MCS Data Rate // URL: <http://www.revolutionwifi.net/revolutionwifi/2014/08/visualizing-how-wi-fi-snr-helps.html> (д.о. 10.06.2018).
17. Parsons K. Ekahau Site Survey Heatmap Visualizations – Part 6: Data Rate // URL: <https://www.ekahau.com/blog/2015/06/22/ekahau-site-survey-heatmap-visualizations-part-6-data-rate/> (д.о. 10.06.2018).
18. Bing B. Emerging Technologies in Wireless LANs. Cambridge University Press. – 2008. – 897 p.
19. Henry J. CUWSS Quick Reference Guide. – Cisco Press. – 2010. – 96 p.

20. Wolfram MathWorld. Gaussian Function. // URL: <http://mathworld.wolfram.com/GaussianFunction.html> (д.о. 10.06.2018).
21. Bradner S., McQuaid J. RFC2544 Ben-chmarking Methodology for Network Inter-connect Devices. Bradner&McQuaid. 1999.
22. Lukaszewski C. Aruba VHD 802.11ac Net-works Validated Reference Design. Theory Guide, Vol. 1. Aruba Networks. – 2015. – 62 p.

Получено 10.09.2018

Викулов Антон Сергеевич, аспирант Кафедры сетей связи и передачи данных (ССПД) Санкт-Петербургского Государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича (СПбГУТ). Тел. +7-812-305-12-65. E-mail: asv012016@gmail.com

Парамонов Александр Иванович, профессор Кафедры ССПД СПбГУТ. Тел. +7-812-305-12-65. E-mail: alex-in-spb@yandex.ru

OFDM CHANNEL MODEL IN THE PROBLEM OF THE IEEE 802.11 NETWORK EFFICIENCY ESTIMATION

Vikulov A.S., Paramonov A.I.

*St. Petersburg State University of Telecommunications named after Professor M. A. Bonch-Bruevich, St. Petersburg, Russian Federation
E-mail: asv012016@gmail.com*

This article discusses the issues of ensuring the efficiency of the IEEE 802.11 standard network. An orthogonal frequency-division multiplexing channel model is proposed as a function between its basic parameters and the application conditions. The frame transmission time is selected as the main characteristic. Modern enterprise wireless networks require high signal strength as coverage requirements and hence signal strength from the access point cannot be itself a good parameter for data rate selection. Thus, analytical models are obtained for the number of bits in the symbol and the data frame transmission time as a function of the signal to noise ratio for the IEEE 802.11ac standard. The model analysis shows that the error of the model is less than 6% for the most of the data frame size values. The proposed analytical models can be used to assess the effectiveness of the network and, thus, help in the design process of the modern enterprise networks, which require high signal strength for wireless coverage.

Keywords: wireless local area network, IEEE 802.11ac, signal to noise ratio, channel efficiency, modulation and coding sequence, frame transmission time

DOI: 10.18469/ikt.2018.16.3.06

Vikulov Anton Sergeevich, St. Petersburg State University of Telecommunications named after Professor M. A. Bonch-Bruevich, Bolshevikov pr., 22-1, St. Petersburg, 193232, Russian Federation; PhD student of the Department of Communication and Data Networks. Tel. +78123051265. E-mail: asv012016@gmail.com

Paramonov Alexander Ivanovich, St. Petersburg State University of Telecommunications named after Professor M. A. Bonch-Bruevich, Bolshevikov pr., 22-1, St. Petersburg, 193232, Russian Federation; Professor of the Department of Communication and Data Networks, Doctor of Technical Sciences. Tel. +78123051265. E-mail: alex-in-spb@yandex.ru

References

1. Bianchi G. Performance Analysis of the IEEE 802.11 Distributed Coordination Function. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2000, vol. 18, pp. 535-548.
2. Oliveira R., Bernardo L., Pinto P. Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function with unicast and broadcast traffic. *The 17th Annual IEEE International Symposium on*

- Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC'06)*, Helsinki, 2006. doi: 10.1109/PIMRC.2006.254094
3. Kochut A., Vasan A., Shankar A., Agrawala A. Sniffing Out the Correct Physical Layer Capture Model in 802.11b. *12th IEEE International Conference on Network Protocols (ICNP 2004)*, Berlin, 2004. doi: 10.1109/ICNP.2004.1348115.
 4. Vishnevskiy V.M., Lyakhov A.I., Portnoy S.L., Shakhnovich I.L. *Shirokopolosnye besprovodnye seti peredachi informacii* [Broadband wireless communication networks]. Moscow, Technosfera Publ., 2005. 592 p.
 5. Halperin D.C. *Simplifying the Configuration of 802.11 Wireless Networks with Effective SNR*. PhD dissertation, Washington, 2012. 179 p.
 6. Kamerman A., Monteban L. WaveLAN: A high-performance wireless LAN for the unlicensed band. *Bell Labs Technical Journal*, 1997, vol. 2. no. 3. pp. 118–133. doi: 10.1002/bltj.2069.
 7. Lacage M., Manshaei M.H., Turletti T. IEEE 802.11 rate adaptation: A practical approach. *Proceedings of the ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWIM)*, Venice, 2004, pp. 126–134.
 8. Goldsmith A. *Wireless Communications*. Cambridge University Press, 2005. 427 p.
 9. Davydov A.V., Maltsev A.A. The benchmarking study of signal detection methods in MIMO-OFDM communication systems. *Vestnik of Lobachevsky University of Nizhni Novgorod*, 2005, no. 1, pp. 80–86.
 10. Holland G., Vaidya N., Bahl P. A rate-adaptive MAC protocol for multi-hop wireless networks. *Proceedings of the ACM International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom)*, Rome, 2001, pp. 236–251.
 11. Paramonov A., Hussain O., Samouylov K., Koucheryavy A., Kirichek R., Koucheryavy Y. Clustering Optimization For Out-Of-Band D2D Communications. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2017. doi: 10.1155/2017/6747052.
 12. Makolkina M., Vikulov A., Paramonov A. The augmented reality service provision in D2D network. *Proceedings of 20th International Conference. Distributed Computer and Communication Networks (DCCN 2017)*, Moscow, 2019, pp. 281–290.
 13. IEEE Std 802.11 – 2016. IEEE 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, New York, 2016. 3534 p.
 14. Cisco Systems. Cisco Wireless Mesh Access Points, Design and Deployment Guide 8.0. Cisco Systems, 2016. 260 p.
 15. Aruba Networks. Aruba 802.11ac In-depth White paper. Aruba Networks, 2014. 37 p.
 16. Von Nagy A. Visualizing How Wi-Fi SNR Helps Determine the Achievable MCS Data Rate. Available at: <http://www.revolutionwifi.net/revolutionwifi/2014/08/visualizing-how-wi-fi-snr-helps.html> (accessed 10.06.2018).
 17. Parsons K. Ekahau Site Survey Heatmap Visualizations. Part 6: Data Rate. Available at: <https://www.ekahau.com/blog/2015/06/22/ekahau-site-survey-heatmap-visualizations-part-6-data-rate/> (accessed 10.06.2018)
 18. Bing B. *Emerging Technologies in Wireless LANs*. Cambridge University Press, 2008. 897 p.
 19. Henry J. *CUWSS Quick Reference Guide*, Cisco Press, 2010. 96 p.
 20. Wolfram MathWorld. Gaussian Function. Available at: <http://mathworld.wolfram.com/GaussianFunction.html> (accessed 10.06.2018)
 21. Bradner S., McQuaid J. *RFC2544 Benchmarking Methodology for Network Interconnect Devices*. Bradner&McQuaid, 1999.
 22. Lukaszewski C. *Aruba VHD 802.11ac Networks Validated Reference Design. Theory Guide, vol. 1*, Aruba Networks, 2015. 62 p.

Received 10.09.2018