

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ФИЗИЧЕСКОГО УРОВНЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ БЕСПРОВОДНОЙ СЕТИ СТАНДАРТА IEEE 802.11

Целью работы является исследование характера влияния параметров физического уровня на характеристики беспроводной сети стандарта IEEE 802.11, а также определение наиболее эффективного варианта физического уровня протокола IEEE 802.11 для передачи пакетов малой длины, характерных для систем управления и контроля. Для аналитического исследования была использована математическая модель на основе двумерной цепи Маркова. Получены выражения для расчета пропускной способности и времени задержки с учетом влияния параметров физического уровня. Исследование было выполнено для пакетов малого и большого размера, а также различных скоростей передачи данных.

Ключевые слова: WLAN, беспроводные сети, MAC, IEEE 802.11, IEEE 802.11a, IEEE 802.11b, IEEE 802.11g, физический уровень, производительность, задержка.

Введение

Беспроводные локальные сети (WLAN), основывающиеся на стандарте IEEE 802.11 [IEEE, 1999], широко распространены и используются в различных приложениях, от организации доступа в Интернет до систем автоматизации промышленных предприятий.

Основным механизмом доступа к среде в сетях стандарта IEEE 802.11 является функция распределенного управления – Distributed Coordination Function (DCF). В основе DCF лежит протокол множественного доступа с проверкой несущей и разрешением коллизий – carrier sense multiple access protocol with collision avoidance (CSMA/CA).

Работы [Bianchi, 2000] и [Cali, 2000] являлись базовыми для развития методов оценки производительности беспроводных сетей IEEE 802.11. В этих работах оценивалась пропускная способность локальной беспроводной сети в условиях высокой нагрузки. В них используется дискретная целочисленная временная шкала работы сети, единицей которой является виртуальный слот. Виртуальные слоты не одинаковы, и каждый из них может представлять из себя: 1) «пустой» слот отсрочки σ , в котором ни одна из станций не ведет передачу; 2) «успешный» слот, в котором только одна из станций передает пакет; 3) «коллизсионный» слот, в котором передают две или более станции. Как было показано Вишневым и Ляховым в работе [Vishnevsky, Lyakhov, 2002], являющейся развитием [Bianchi, 2000] и [Cali, 2000], предположения моделей Бьянки и Кали эквивалентны. Вышеописанные работы проводились при предположении идеального канала передачи, основное внимание уделялось оценке производительности сети.

В работах [Chatzimisios, 2003; Chhaya, Gupta, 1997; Hadzi-Velkov, Spasenovski, 2003] рассматривались вопросы, посвященные исследованию характеристик задержки и вероятности потерь. Исследования основных характеристик MAC уровня IEEE 802.11, с учетом различных вариантов физического уровня, для случая передачи пакетов малой длины до этого не проводились. Целью данной работы является определение наиболее эффективного варианта физического уровня протокола IEEE 802.11 для передачи пакетов малой длины, характерных для систем управления и контроля.

Существует несколько вариантов физического уровня протокола, данные о них приведены в табл. 1.

Таблица 1

Физические уровни стандарта IEEE 802.11

	802.11 (FHSS / DSSS)	802.11a	802.11g (pure / hybrid)	802.11b
σ , мкс	50 / 20	9	9 / 20	20
SIFS, мкс	28 / 10	16	16 / 10	10
DIFS, мкс	128 / 50	34	34 / 50	50
PHY_{hdr} , мкс	96 / 144	4	4 / 76(148)	72(144)
$PHY_{preambles}$, мкс	32 / 48	16	16 / 40(64)	24(48)
CW_{min}	15 / 31	15	15 / 31	31
CW_{max}	1 023 / 1 023	1023	1 023 / 1 023	1 023
S , Мбит/с	1, 2 / 1, 2	6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54	6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54 / 1, 2, 5,5, 11	1, 2, 5,5, 11

IEEE 802.11 [IEEE, 1999] – исходный стандарт семейства 802.11, поддерживающий два типа физического уровня для передачи данных в диапазоне 2,4 ГГц: Frequency-Hopping spread spectrum (FHSS) со скоростями 1 Мбит/с (two-level Gaussian frequency shift keying (2GFSK) модуляция) и 2 Мбит/с (Four-level Gaussian frequency shift keying 4GFSK модуляция), и Direct sequence spread spectrum (DSSS) со скоростями 1 Мбит/с (Binary phase shift keying (DBPSK) модуляция) и 2 Мбит/с (differential quadrature phase shift keying (DQPSK) модуляция). Физический уровень DSSS рассматриваться в дальнейшем не будет, так как его основные параметры совпадают с параметрами IEEE 802.11b [IEEE, 2001].

IEEE 802.11a [IEEE, 2003] работает в диапазоне 5,8 ГГц. Физический уровень 802.11a базируется на многочастотной системе Orthogonal Frequency Division Multiplexing OFDM. Имеется возможность использовать 7 различных скоростей передачи данных от 6 Мбит/с (binary phase shift keying (BPSK) модуляция, FEC 1/2) до 54 Мбит/с (64-quadrature amplitude modulation модуляция (64 QAM), FEC 3/4).

IEEE 802.11b [IEEE, 2001] высокоскоростное расширение DSSS режима исходного стандарта IEEE 802.11 [IEEE, 1999], работает в диапазоне 2,4 ГГц. Поддерживаются скорости передачи данных 1 Мбит/с и 2 Мбит/с исходного стандарта IEEE 802.11, а также дополнительный вид модуляции Complementary Code Keying (ССК), позволяющий получить скорость передачи данных в 5,5 и 11 Мбит/с. Для повышения эффективности работы имеется возможность использования короткой физической преамбулы (приведена в скобках в таблице).

IEEE 802.11g [IEEE, 2003] – расширение стандарта IEEE 802.11b, также работающий в диапазоне 2,4 ГГц. Поддерживает два физических уровня: первый идентичный IEEE 802.11b для обратной совместимости с оборудованием IEEE 802.11b, и OFDM, идентичный 802.11a. Возможны два режима работы – «гибридный», с поддержкой совместимости с 802.11b, и «чистый» без поддержки. Фактически «чистый» режим работы представляет собой IEEE 802.11a, работающий в диапазоне 2,4 ГГц, поэтому далее рассматриваться не будет.

Модель и постановка задачи

Для проведения расчетов была использована математическая модель на основе цепи Маркова [Bianchi, 2000], имеющая ряд допущений:

- все станции работают в режиме высокой нагрузки, т. е. у станции всегда имеется пакет, предназначенный для передачи;
- вероятность возникновения коллизии не зависит от количества предшествующих попыток передачи.

Несмотря на существенные допущения, корректность результатов, полученных с помощью этой модели, подтверждается путем симуляционного компьютерного моделирования.

Данный анализ проводится для условий идеального канала (отсутствие ошибок, скрытых терминалов, эффекта захвата [Raptis, 2004]). Рассматривается фиксированное число станций.

Итак, рассмотрим беспроводную сеть, состоящую из n станций, каждая из которых постоянно имеет пакет, предназначенный для передачи. Длины пакетов одинаковы и равны T_{pkt} . Доступ к среде передачи данных осуществляется согласно функции распределенного управления – Distributed Coordination Function (DCF) [IEEE, 1999]. Каждый пакет вступает в коллизию с постоянной и независимой вероятностью p . p будет обозначена как условная вероятность коллизии, т. е. вероятность коллизии, которая происходит с пакетом во время его передачи по каналу.

τ – это вероятность того, что станция производит передачу в случайном временном слоте.

Подробный вывод системы уравнений для расчета значений вероятности τ и условной вероятности коллизии p содержится в [Bianchi, 2000], и в данной работе не приводится из-за ограничений в размерах.

Решение задачи

Расчет производительности. Пусть S – производительность, которая определяется как отношение полезной нагрузки к полной нагрузке. Для того чтобы рассчитать S , необходимо проанализировать ситуацию, которая может произойти в случайно выбранном временном слоте.

Пусть P_{tr} – вероятность того, что хотя бы одна передача в рассматриваемом временном слоте. Так как n станций конкурируют за доступ к каналу, каждая передает с вероятностью τ :

$$P_{tr} = 1 - (1 - \tau)^n. \quad (1)$$

P_s – вероятность того, что передача, происходящая в канале, успешна. Задается вероятностью, что только одна станция передает, при условии, что хотя бы одна передача в рассматриваемом временном слоте:

$$P_s = \frac{n\tau(1 - \tau)^{n-1}}{P_{tr}} = \frac{n\tau(1 - \tau)^{n-1}}{1 - (1 - \tau)^n}. \quad (2)$$

Вероятности τ и p находятся путем численного решения нелинейной системы с двумя неизвестными [Bianchi, 2000]:

$$\tau = \frac{2(1 - 2p)}{(1 - 2p)(W + 1) + pW(1 - (2p)^m)}, \quad (3)$$

$$p = 1 - (1 - \tau)^{n-1}, \quad (4)$$

где p – вероятность возникновения коллизии.

Мы можем выразить S как соотношение

$$S = \frac{T_{payload}}{T_{all}}, \quad (5)$$

где $T_{payload}$ – полезная нагрузка; T_{all} – полная нагрузка, которые заданы соответственно:

$$T_{payload} = P_s P_{tr} T_{pkt}; \quad (6)$$

$$T_{total} = (1 - P_{tr})T_{slot} + P_{tr}P_sT_s + P_{tr}(1 - P_s)T_c. \quad (7)$$

Таким образом, получаем:

$$S = \frac{P_s P_{tr} T_{pkt}}{(1 - P_{tr})T_{slot} + P_{tr}P_sT_s + P_{tr}(1 - P_s)T_c}, \quad (8)$$

где

T_{pkt} – длина пакета, в данной работе принимается допущение о фиксированной длине передаваемого пакета;

P_s – вероятность успешной передачи пакета;

P_{tr} – вероятность, что хотя бы одна станция передает пакет в данный момент времени;
 T_s – среднее время, которое канал остается занятым во время успешной передачи;
 T_c – среднее время, которое канал остается занятым во время возникновения коллизии;
 T_{slot} – длительность временного слота.

В работе рассматривается передача пакетов небольшой длины, в виду этого значения T_s и T_c рассчитываются для механизма «простой» передачи без использования метода RTS/CTS [IEEE, 1999].

Для физического уровня стандарта IEEE 802.11 и физического уровня стандарта IEEE 802.11b выражения для T_s и T_c будут иметь вид:

$$\begin{aligned} T_s &= 2T_{preamble} + 2T_{hdr} + \frac{T_{MAC} + T_{pkt}}{S} + T_{SIFS} + 2T_{prg} + T_{SIFS} + \frac{T_{ACK}}{S} + T_{DIFS}; \\ T_c &= T_{hdr} + T_{preamble} + \frac{T_{MAC} + T_{pkt}}{S} + T_{DIFS} + T_{prg}. \end{aligned} \quad (9)$$

Для физического уровня стандарта IEEE 802.11a и физического уровня стандарта IEEE 802.11g, выражения для T_s и T_c будут иметь вид:

$$\begin{aligned} T_s &= 2T_{preamble} + 2T_{hdr} + 4 \cdot celi \left(\frac{L_{service} + T_{MAC} + T_{pkt} + L_{tail}}{NDBPS} \right) + T_{SIFS} + 2T_{prg} + \\ &+ T_{SIFS} + 4 \cdot celi \left(\frac{T_{service} + T_{ACK} + Tail}{NDBPS} \right) + T_{DIFS} \\ T_c &= T_{hdr} + T_{preamble} + 4 \cdot celi \left(\frac{L_{service} + T_{MAC} + T_{pkt} + L_{tail}}{NDBPS} \right) + T_{DIFS} + T_{prg}, \end{aligned} \quad (10)$$

где

T_{hdr} – заголовок пакета PHY_{hdr} ;

T_{prg} – время распространения;

T_{ACK} – длительность пакета, подтверждающего правильность приема;

T_{DIFS} – длительность интервала DIFS;

T_{SIFS} – длительность интервала SIFS;

T_{pkt} – средняя длина пакета;

$T_{preamble}$ – преамбула физического уровня;

T_{MAC} – заголовок MAC уровня;

S – скорость передачи данных;

$L_{service}$ – сервисное поле, для передачи служебной информации;

L_{tail} – дополнительные хвостовые биты;

$NDBPS$ – количество бит, передаваемых с помощью одного OFDM символа, зависит от скорости передачи данных [IEEE, 2003];

$celi$ – операция округления до наибольшего целого.

Значения параметров $T_{ACK} = 112bits$, $MAC_{hdr} = 224bits$, $L_{tail} = 6bits$, $L_{service} = 16bits$, $n = 5$, а также значения остальных параметров приведены в табл. 1. Значения T_{ACK} , MAC_{hdr} , L_{tail} , $L_{service}$ задаются в битах, а затем пересчитываются в единицы времени в соответствии со скоростью передачи данных. Необходимо отметить, что, согласно стандарту, передача служебной информации ведется на скорости 1 Мбит/с, это сделано для сохранения обратной совместимости. Значения вероятностей P_s и P_{tr} заданы соответственно формулами (1) и (2).

Расчет среднего времени задержки. При отсутствии «скрытых терминалов», ошибок в канале, а также эффекта захвата канала, коллизии возникают в случае, если две или более станции выбрали один и тот же слот для отправки пакета. Время, необходимое для передачи

пакета, начинается, когда пакет достиг начала очереди станции, и заканчивается, когда получено подтверждение доставки. Таким образом, среднее время задержки пакета будет складываться из суммы промежутков времени, на которые пакет задерживается на каждой стадии выжидания:

$$E[T_{delay}] = \sum_{i=0}^m (E[T_i] \cdot q_i), \quad (11)$$

где T_i – период времени, в течение которого успешно переданный пакет был задержан на i -й стадии выжидания, и q_i – вероятность, что успешно переданный пакет достиг i -й стадии выжидания.

$E[T_i]$ задано следующим образом:

$$E[T_i] = d_i \cdot T_{total}, \quad i \in [0, m], \quad (12)$$

где T_{total} задано в (3), а d_i – среднее количество временных интервалов, на которые пакет был задержан по достижении i -й стадии выжидания; m – максимальное количество попыток передачи.

d_i задано следующим образом:

$$d_i = (W_i + 1) / 2, \quad i \in [0, m], \quad (13)$$

где W_i – размер окна «конкуренции», на i -й стадии выжидания.

Вероятность q_i определяется формулой:

$$q_i = \frac{p^i - p^{m+1}}{1 - p^{m+1}}, \quad i \in [0, m], \quad (14)$$

где $(1 - p^{m+1})$ – вероятность, что пакет не потерян, $(p^i - p^{m+1}) / (1 - p^{m+1})$ – вероятность, что пакет не потерян, достигнув i -й стадии выжидания.

Таким образом, получаем:

$$E[T_{delay}] = T_{total} \cdot \sum_{i=0}^m \left(\frac{W_i + 1}{2} \cdot \frac{p^i - p^{m+1}}{1 - p^{m+1}} \right), \quad (15)$$

где p задано в (4).

Численное исследование и анализ полученных результатов

Для осуществления сравнительного анализа за основу были взяты скорости передачи данных физического уровня IEEE 802.11a, а затем приняты допущения о возможности использования этих скоростей при работе остальных физических уровней. Графики зависимостей, полученных в результате расчета, приведены на рис. 1 и 2. Расчет производился для скорости передачи данных 6 Мбит/с и длине пакета 60 байт. На приведенных рисунках явно выделяется значительное превосходство физического уровня 802.11a как по критерию «пропускная способность», так и по критерию «задержка». Худшими характеристиками обладает 802.11g с длинной физической преамбулой, значения данных характеристик будут использованы как базисные для проведения сравнительного анализа.

На основе полученных данных был произведен расчет средних значений параметров «пропускная способность» и «задержка». Физический уровень 802.11a превосходит физический уровень 802.11g с длинной преамбулой примерно в 3 раза по параметру «задержка» и примерно в 2,3 раза по параметру «пропускная способность». Средние значения параметров «задержка» и «пропускная способность» физического уровня 802.11a превосходят значения этих параметров физического уровня 802.11b с короткой преамбулой в 2 и 1,5 раза соответ-

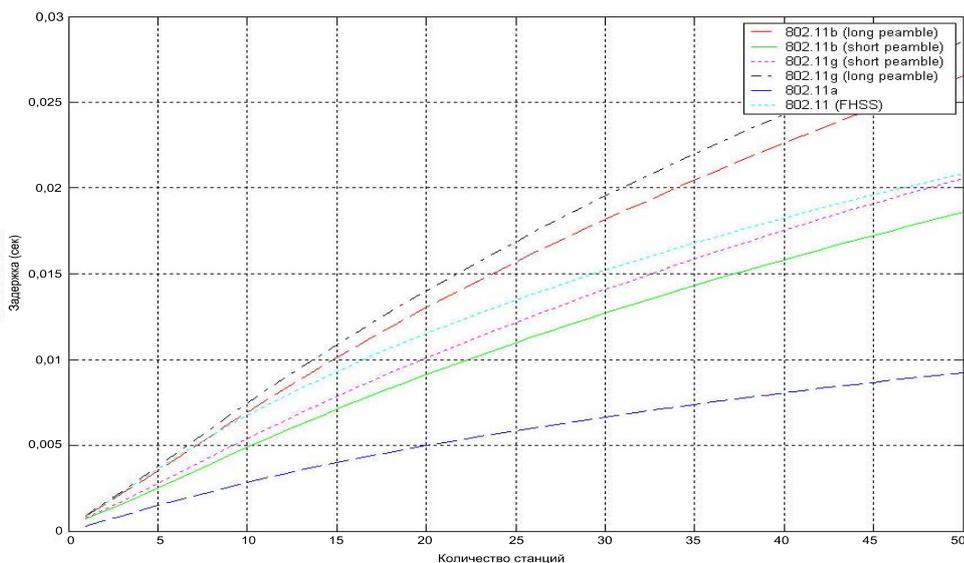


Рис. 1. Зависимость величины задержки от числа станций для различных физических уровней

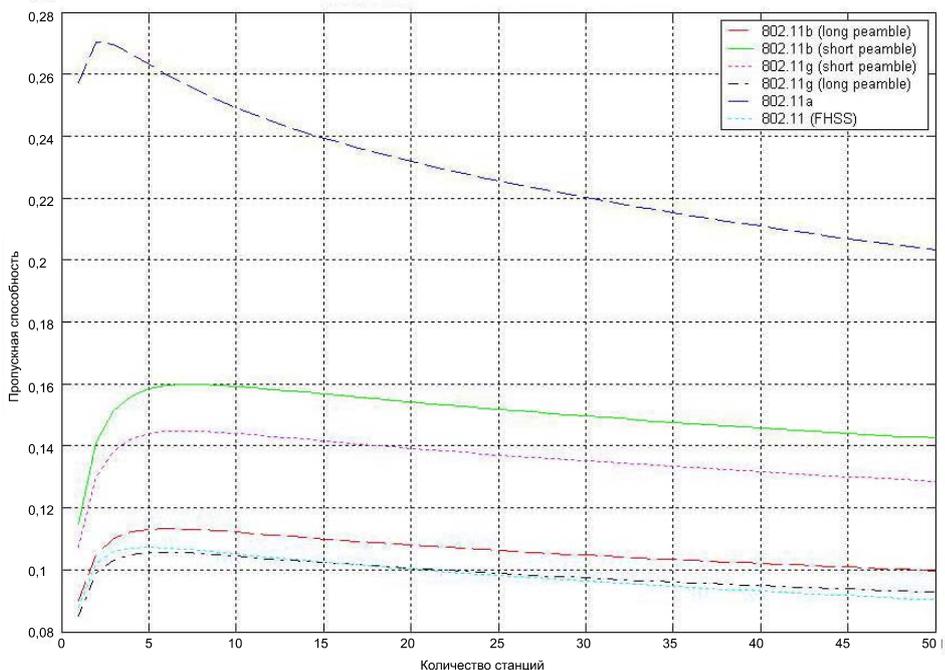


Рис. 2. Зависимость пропускной способности от числа станций для различных физических уровней

ственно. Значения параметров других физических уровней отличаются от базисного, в среднем по параметру «задержка» от 7 до 28 %, и по параметру «пропускная способность» от 0 до 38 %. С увеличением скорости передачи данных до 54 Мбит/с разница в характеристиках 802.11a в сравнении с 802.11g (длинная преамбула), доходит до 5 раз по параметру «задержка» и до 4 раз по параметру «пропускная способность».

Графики зависимостей производительности и задержки от размера пакета приведены на рис. 3 и 4 соответственно, расчеты были произведены для «крайнего» случая – скорость передачи 6 Мбит/с и количество станций 100.

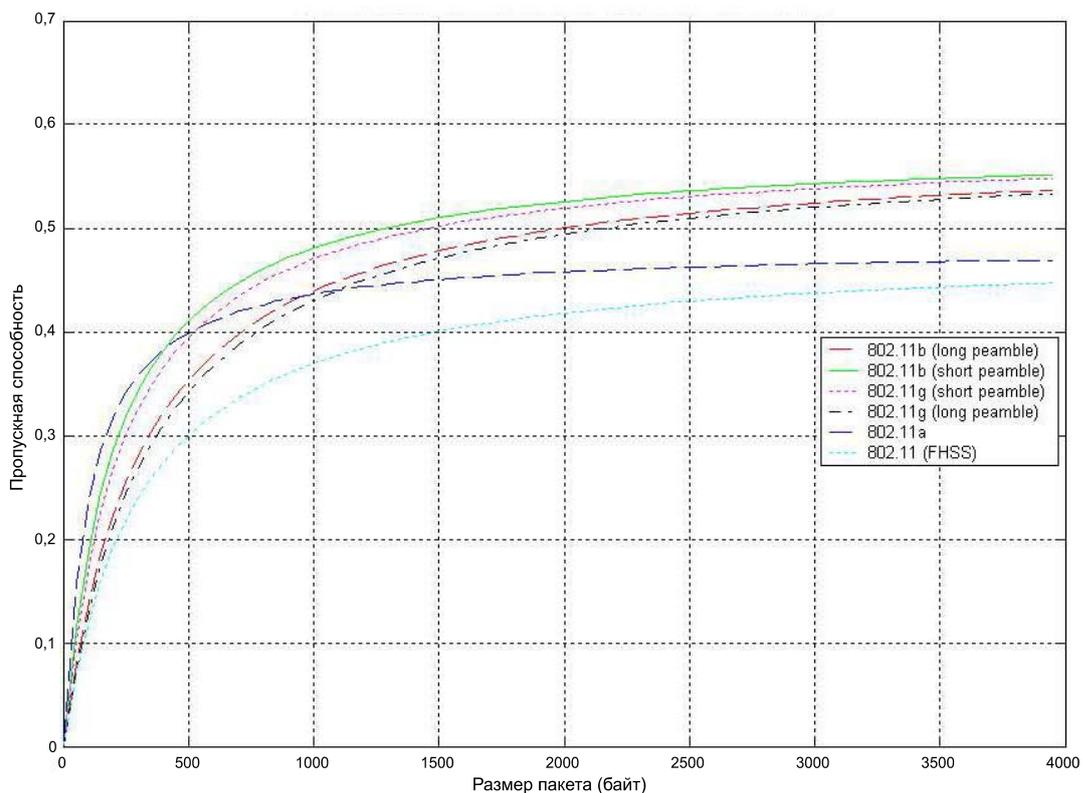


Рис. 3. Зависимость пропускной способности от длины пакета для различных физических уровней

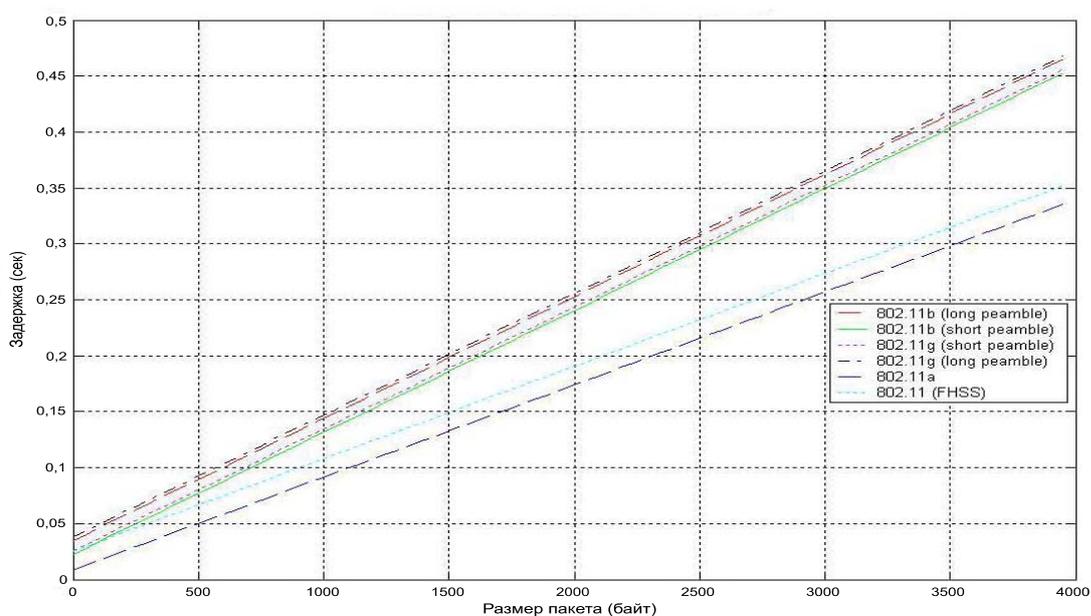


Рис. 4. Зависимость задержки от длины пакета различных физических уровней

Таблица 2

Сравнительные характеристики физических уровней стандарта IEEE 802.11

	802.11g длинная преамбула	802.11a	802.11b короткая преамбула	802.11g короткая преамбула	802.11	802.11b длинная преамбула
Средняя пропускная способность	0,098	0,226	0,151	0,137	0,097	0,106
Средняя задержка, мс	17,51	5,97	11,4	12,67	13,66	16,28
Средняя задержка, %	100	34,96	65,24	72,35	80,71	93,03
Средняя пропускная способность, %	100	228,75	153,28	138,47	99,19	107,50

При размере пакета свыше 400 байт пропускная способность физического уровня 802.11b с короткой преамбулой становится выше, чем пропускная способность 802.11a. При изменении параметров расчета, как при увеличении скорости передачи данных, так и при уменьшении количества станций, происходит увеличение размера пакета, при котором происходит ухудшение характеристик 802.11a по параметру «пропускная способность», по сравнению с характеристиками 802.11b с короткой преамбулой. Можно отметить, что по параметру «задержка» 802.11a обладает наилучшими характеристиками по сравнению с другими вариантами реализации физического уровня.

Хотелось бы отметить, что параметры физического уровня 802.11a совпадают с параметрами физического уровня 802.11g в его «чистой» (без возможности совместимости с 802.11b) версии, за исключением используемых частотных диапазонов. Таким образом, все результаты, полученные для 802.11a, справедливы для 802.11g (без возможности совместимости с 802.11b).

Заключение

В результате проделанной работы было установлено:

- физический уровень 802.11a/g является оптимальным для передачи пакетов малой длины (менее 100 байт) как по параметрам пропускной способности, так и задержки, независимо от количества станций и скорости передачи данных;
- в случае оптимального выбора физического уровня происходит уменьшение задержки в 3 раза и увеличение пропускной способности в 2,3 раза, по сравнению с неоптимальным вариантом. Для условий: размер пакета 60 байт, скорость передачи данных 6 Мбит/с, количество узлов 20;
- использование короткой преамбулы дает прирост пропускной способности в среднем на 40 % и уменьшение задержки в среднем на 30 %. Для условий: размер пакета 60 байт, скорость передачи данных 6 Мбит/с, количество узлов 20;
- физический уровень 802.11a/g превосходит ближайший к нему по качеству характеристик физический уровень 802.11b (короткая преамбула), по параметру «задержка» в 2 раза, по параметру «пропускная способность» в 1,5 раза. Для условий: размер пакета 60 байт, скорость передачи данных 6 Мбит/с, количество узлов 20.

Использование физического уровня 802.11a и 802.11g (без возможности совместимости с 802.11b), в случае передачи пакетов малой длины, менее 100 байт, приводит к значительному улучшению основных характеристик протокола IEEE 802.11. Применение вариантов реали-

зации физических уровней с использованием короткой преамбулы, в случае передачи пакетов малой длины, менее 100 байт, приводит к улучшению основных характеристик протокола IEEE 802.11. В дальнейшем представляется интересным рассмотрение таких задач, как изучение влияния физического уровня 802.11a на характеристики протокола IEEE 802.11 в аспекте выбора оптимальной скорости, в случае передачи пакетов малой длины, менее 100 байт. А также сравнительный анализ влияния различных вариантов реализаций физического уровня на характеристики протокола IEEE 802.11, в случае передачи пакетов малой длины, менее 100 байт, для канала с ошибками.

Список литературы

- Bianchi G.* Performance Analysis of the IEEE 802.11 Distributed Coordination Function // IEEE Journal on Selected Area in Communications. 2000. Vol. 18. № 3. P. 535–547.
- Cali F.* Dynamic Tuning of the IEEE 802.11 Protocol to Achieve a Theoretical Throughput Limit // IEEE Transactions on Networking. December, 2000. Vol. 8. № 6. P. 785–790.
- Chatzimisios P.* IEEE 802.11 Packet Delay – A Finite Retry Limit Analysis // IEEE GLOBECOM. December, 2003. Vol. 2. P. 950–954.
- Chhaya H. S., Gupta. S.* Performance Modeling Of Asynchronous Data Transfer Methods Of IEEE 802.11 MAC protocol // Wireless Networks. 1997. Vol. 3. № 3. P. 217–234.
- Hadzi-Velkov Z., Spasenovski B.* Saturation Throughput-Delay Analysis of IEEE 802.11 DCF in Fading Channel // Proc. of IEEE International Conference on Communications (ICC). May, 2003. Vol. 1. P. 121–126.
- IEEE standard for Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications, IEEE Std: 802.11b-1999/Cor 1-2001, 2001.
- IEEE standard for Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. ANSI/IEEE Std 802.11, 1999.
- Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications High-speed Physical Layer in the 5 GHz Band. IEEE Std. 802.11a-1999(R2003).
- Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications Amendment 4: Further Higher Data Rate Extension in the 2.4 GHz Band. IEEE Std. 802.11g™-2003.
- Raptis P.* Packet Delay Modeling of IEEE 802.11 Wireless LANs // IEEE Vehicular Technology Conference (VTC), Los Angeles CA. September 2004. P. 112–118.
- Vishnevsky V. M., Lyakhov A. I.* IEEE 802.11 Wireless LAN: Saturation Throughput Analysis with Seizing Effect Consideration // Cluster Computing. April, 2002. Vol. 5. № 2. P. 133–144.

Материал поступил в редколлегию 26.12.2008

I. S. Yakushev

COMPARATIVE ANALYSIS IMPACT OF PHYSICAL LAYER PARAMETERS ON CHARACTERISTIC OF THE IEEE 802.11 WLAN

Goal of this research is study character of impact physical layer parameters on characteristic of the IEEE 802.11 WLAN, and definition most efficient modification of physical layer of IEEE 802.11 protocol for transmitting small size packets, which typical for control and check systems. Expression, for delay and throughput are obtained, with take into account of physical layer features. For analytical study was used mathematical model base on two-dimension Markov chain. Study is performed for two types of packets small and relative large; different set of physical layers and data rates.

Keywords: Wireless LAN, IEEE 802.11, IEEE 802.11a, IEEE 802.11b, IEEE 802.11g, MAC, physical layer, saturated traffic, performance evaluation.