

УДК 004.732

В.С. Чернега, доцент, канд. техн. наук

Севастопольский национальный технический университет

ул. Университетская 33, г. Севастополь, Украина, 99053

E-mail: v_chernega@rambler.ru

Э. Глатц, профессор, д-р техн. наук

Цюрихская Федеральная высшая техническая школа

Глорияштрассе 35, г. Цюрих, Швейцария, CH-8092

E-mail: eglatz@tik.ee.ethz.ch

С.А. Виниченко, магистрант

Севастопольский национальный технический университет

ул. Университетская 33, г. Севастополь, Украина, 99053

ОЦЕНКА ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ЭФФЕКТИВНОЙ СКОРОСТИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ НА ТРАНСПОРТНОМ УРОВНЕ В СЕТЯХ 802.11b

Детально проанализирована процедура обмена кадрами между клиентскими компьютерами и точкой доступа беспроводной локальной компьютерной сети стандарта 802.11b и получены выражения, позволяющие рассчитать потенциальную эффективную скорость передачи данных в такой сети.

Ключевые слова: *беспроводные локальные сети 802.11b, инфраструктурный режим, установление соединения, пропускная способность, транспортный уровень.*

Пропускная способность беспроводных локальных компьютерных сетей, функционирующих в соответствии со стандартом IEEE 801.11b [1, 3] в инфраструктурном режиме, указываемая производителями в технической документации на телекоммуникационное оборудование, существенно отличается от эффективной скорости передачи данных, с которой происходит обмен полезной информацией между источником и получателем. Это объясняется тем, что в технической документации приводится скорость передачи цифровых сигналов по каналам беспроводной связи и не учитывается служебная информация, входящая в состав передаваемых кадров. Кроме того, не учитываются обязательные межкадровые паузы, вводимые для предотвращения коллизий. Для пользователей сети интерес представляет эффективная скорость передачи, т.е. скорость, с которой информация выдается получателю. В ряде работ приводится расчет реальной пропускной способности в сетях IEEE 801.11b на канальном уровне, однако такая оценка не учитывает тот факт, что обмен данными между абонентами сети осуществляется на транспортном уровне. В других работах [2] дается расчет пропускной способности при обмене данными на транспортном уровне, но только для беспроводных локальных сетей, работающих в независимом режиме Ad Hoc.

Целью данной работы является получение выражения, позволяющего оценить потенциальную эффективную скорость, т.е. максимально возможную скорость передачи полезной информации между пользователями сети при отсутствии коллизий и помех в канале связи. При этом предполагается, что сеть работает в инфраструктурном режиме, при котором обмен кадрами в сети осуществляется через точку доступа AP (Access Point). Эта оценка выполнена только для сетей, работающих по стандарту IEEE 801.11b, так как форматы кадров для сетей 802.11g и 802.11n несколько отличаются.

Потенциальная эффективная скорость передачи данных в беспроводной локальной сети определяется количеством полезной информации в битах N_B , выдаваемой получателю за время сеанса связи T_S , т.е.

$$V_{\text{eff}} = N_B / T_S. \quad (1)$$

Процедура сеанса связи по протоколу TCP между двумя клиентскими станциями STA-1 и STA-2 через точку доступа AP включает фазу установления соединения между источником и получателем, фазу передачи данных, фазу закрытия и разъединения [3]. С учетом этого время сеанса связи представим в следующем виде

$$T_S = T_C + T_{\text{DT-TCP}} + T_{\text{FIN}}, \quad (2)$$

где $T_{\text{DT-TCP}}$ — время фазы передачи данных; T_{FIN} — время фазы завершения и разъединения.

Для определения продолжительности фаз соединения, передачи данных и разъединения построим временные диаграммы сеанса связи между двумя клиентскими компьютерами. С этой целью был проведен детальный анализ процесса обмена кадрами в беспроводной локальной сети, работающей в инфраструктурном режиме, с помощью программы мониторинга и анализа сетевых пакетов CommView for WiFi.

Временная диаграмма обмена кадрами и пакетами на канальном и транспортном уровнях в процессе установления TCP-соединения изображена на рисунке 1. Для различения блоков сообщений, передаваемых на канальном уровне от блоков, передаваемых на транспортном уровне, на диаграмме использованы соответственно названия "кадр" и "пакет".

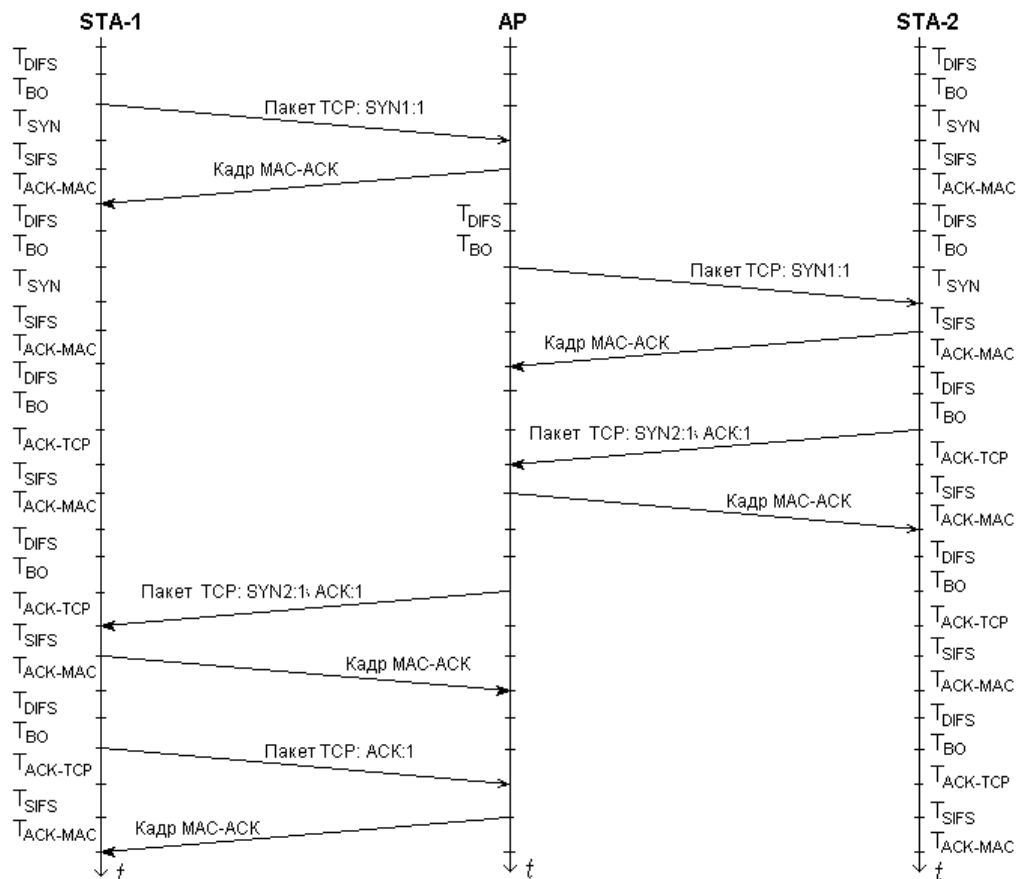


Рисунок 1 — Временная диаграмма обмена пакетами между клиентскими станциями и точкой доступа в процессе установления TCP-соединения

Клиентская станция STA-1, обнаружив, что канал связи свободен, выдерживает обязательную паузу T_{DIFS} , по истечении которой запускает генератор случайных чисел и вычисляет время обратного отсчета (*Backoff*) T_{BO} . Если канал связи по окончании интервала T_{BO} остается свободным, то станция STA-1 формирует TCP-сегмент с установленным флагом синхронизации SYN1:1 и нулевым полем данных. Этот сегмент на сетевом уровне дополняется IP-заголовком, в котором указываются IP-адреса станции назначения STA-2 и станции отправителя STA-1. Сформированный пакет инкапсулируется в кадр канального уровня, в котором содержится MAC-адреса точки доступа (BSSID), получателя STA-2 и источника STA-1. Точка доступа принимает TCP-пакет с битом синхронизации и, при отсутствии в нем ошибок, после выдержки обязательной межкадровой паузы SIFS, отправляет станции STA-1 кадр подтверждения на канальном уровне (кадр MAC-ACK).

На следующем этапе точка доступа наравне с клиентскими станциями сети включается в конкурентную борьбу за получение доступа к среде. Для этого она отсчитывает обязательные интервалы T_{DIFS} и T_{BO} и при отсутствии несущей в канале отправляет станции назначения пакет запроса на установление соединения (пакет TCP: SYN1:1). STA-2 подтверждает правильность приема кадра на канальном уровне и после конкурентной борьбы за канал отправляет пакет с установленными в заголовке TCP флагами подтверждения установления соединения (флаг ACK установлен в 1) и запроса на установление соединения со стороны станции 2 (флаг SYN2:1). Затем аналогичным образом пакет TCP: SYN2:1; ACK:1 доставляется станции STA-1. Подтверждение установления соединения со стороны STA-2 отправляется аналогично отдельным пакетом с установленным в заголовке TCP битом ACK или в составе следующего пакета данных. Этот пакет на временной диаграмме не показан.

Прикладное сообщение передается получателю фрагментами размером не более 1460 байтов в связи с тем, что размер пакета на IP-уровне с учетом TCP- и IP-заголовков не должен превышать 1500 байтов. В

крайнем, худшем, случае в процессе обмена непрерывно передается только один пакет данных. Очевидно, что эффективная скорость в таком случае будет минимальной по причине наличия большой удельной части служебной информации и длительных обязательных интервалов ожидания между передачей пакетов. В реальных условиях число непрерывно передаваемых пакетов данных без ожидания пакета подтверждения TCP:ACK зависит от ширины окна. Экспериментальные исследования показали, что число непрерывно передаваемых пакетов в локальной беспроводной сети колеблется от 2 до 6.

Временная диаграмма обмена кадрами и пакетами между клиентскими станциями и точкой доступа по протоколу TCP в фазе передачи данных изображена на рисунке 2. На диаграмме показан случай непрерывной передачи двух пакетов данных. Перед началом передачи пакетов станция STA-1 должна выиграть в конкурентной борьбе за доступ к среде. Это происходит только в случае, если время обратного отсчета T_{BO} в данной станции, будет наименьшее по сравнению с аналогичным параметром в остальных станциях локальной сети, пытающихся получить доступ к каналу, включая и точку доступа. На диаграмме с целью уменьшения ее размеров интервал T_{BO} , выдерживаемый станциями перед отправкой пакета подтверждения TCP:ACK, не показан.

Процесс закрытия соединения состоит в том, что одна из станций должна отправить пакет с установленным в единичное состояние флагом FIN. Подтверждение транспортировки такого пакета осуществляется отдельно как на канальном, так и на транспортных уровнях. Посылка одной из станций пакета с установленным флагом RST приводит к разрыву соединения. Временная диаграмма этой процедуры аналогична изображенной на рисунке 1.

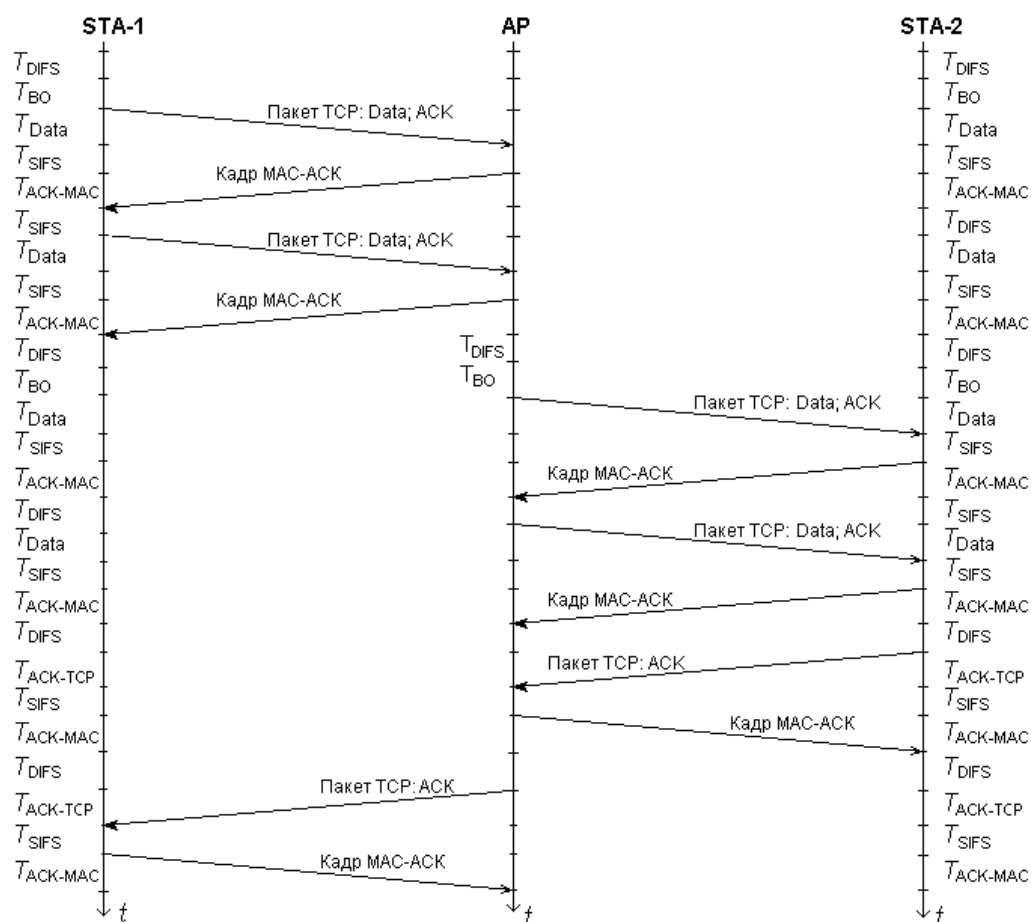


Рисунок 2 — Временная диаграмма передачи данных между клиентскими станциями по TCP-протоколу

Время сеанса связи T_S в формуле (2) включает интервал установления соединения T_C , время передачи данных T_{DT} и время разъединения связи T_{FIN} . Суммарные временные затраты на данные процедуры без учета потерь кадров и их повторной передачи определяется на основе приведенных временных диаграмм по следующим формулам:

$$T_C = 4(T_{DIFS} + T_{BO} + T_{ACK-MAC}) + 2(T_{SYN} + T_{ACK-TCP}); \quad (3)$$

$$T_{TD-TCP} = 4(T_{DIFS} + T_{BO} + T_{SIFS} + T_{ACK-MAC}) + 2(T_{DATA} + T_{ACK-TCP}); \quad (4)$$

где $T_{ACK-MAC}$, $T_{ACK-TCP}$ и T_{SYN} — длительности пакетов подтверждения на MAC-уровне, TCP-уровне и пакета синхронизации соответственно; T_{DATA} — время передачи пакета данных с размером информационного поля в кадре данных N_{DATA} бит.

В связи с тем, что временная диаграмма фазы разъединения аналогична диаграмме установления соединения, то $T_{FIN} = T_C$. С учетом того, что пакеты подтверждения канального и транспортного уровней, а также пакеты данных передаются в составе кадров физического уровня, то затраты времени на их передачу определяются соответственно по следующим формулам:

$$T_{SYN} = [T_{PHY} + (H_{TCP} + H_{IP} + H_{SNAP} + H_{MAC})/V_D]; \quad (5)$$

$$T_{ACK-MAC} = T_{PHY} + H_{MAC}/V_D; \quad (6)$$

$$T_{ACK-TCP} = [T_{PHY} + (H_{TCP} + H_{IP} + H_{SNAP} + H_{MAC})/V_D]; \quad (7)$$

$$T_{DATA} = [T_{PHY} + (H_{TCP} + H_{IP} + H_{SNAP} + H_{MAC})/V_D] + 8N_{DATA}/V_D, \quad (8)$$

где $T_{PHY} = N_{PHY}/V_{PR}$ — время передачи заголовка физического уровня; V_{PR} — скорость передачи преамбулы; N_{PHY} — длина заголовка физического уровня в битах; V_H — скорость передачи заголовков и данных; H_{TCP} , H_{IP} , H_{MAC} и H_{SNAP} — размер заголовков в битах соответственно транспортного, сетевого, канального и SNAP уровней.

Как показал анализ сетевого потока между клиентскими станциями и точкой доступа для управления потоком используется оконный алгоритм, согласно которому передатчик отправляет N_W пакетов данных, не ожидая подтверждения. Пакет подтверждения ACK-TCP отправляется на группу пакетов данных, задаваемую шириной окна N_W . В этом случае формула (4) принимает следующий вид

$$T_{TD-TCP} = 2N_W(T_{DIFS} + T_{BO} + T_{DAT} + T_{SIFS} + T_{ACK-MAC}) + 2(T_{DIFS} + T_{BO} + T_{SIFS} + T_{ACK-MAC} + T_{ACK-TCP}). \quad (9)$$

Обмен данными на транспортном уровне по протоколу UDP осуществляется без предварительного установления соединения и без подтверждения правильности приема пакета. В таком случае время передачи пакета от станции отправителя до станции получателя с учетом ретрансляции пакета точкой доступа рассчитывается по следующей формуле

$$T_{TD-UDP} = 2(T_{DIFS} + T_{BO} + T_{SIFS} + T_{DATA} + T_{ACK-MAC}). \quad (10)$$

Структура и размер преамбулы, заголовков более высоких уровней, а также межкадровых интервалов для сети IEEE 802.11b регламентируются стандартом [1] и имеют значения, приведенные в таблице 1.

Таблица 1 — Параметры передачи сообщений по IEEE 802.11b

Наименование параметра	Обозначение	Значение
Межкадровая пауза DIFS	T_{DIFS}	50 мкс
Межкадровая пауза SIFS	T_{SIFS}	10 мкс
Размер преамбулы	N_{PHY}	192 бит
Скорость передачи преамбулы	V_{PR}	1 Мбит/с
Размер заголовка MAC	H_{MAC}	34 байта
Размер заголовка SNAP	H_{SNAP}	5 байтов
Размер заголовка IP	H_{IP}	20 байтов
Размер заголовка TCP	H_{TCP}	32 байта
Размер заголовка UDP	H_{UDP}	8 байтов
Длина тайм-слота	Δt	20 мкс
Минимальное значение счетчика обратного отсчета	C_{min}	31
Размер MAC-кадра ACK	N_{PHY}	14 байтов

В беспроводных сетях с распределенной функцией координации доступа время обратного отсчета T_{BO} определяется как произведение длины тайм-слота на случайное число C_i , генерируемое датчиком случайных чисел с равномерным законом распределения [3]. В данной работе при расчете T_{BO} в качестве C_i принималось среднее значение, выбранное из случайного интервала, генерируемого датчиком случайных чисел в диапазоне от 0 до C_{min} , т.е. $T_{BO} = (\Delta t \times C_{min})/2$. Это время, исходя из стандартных табличных значений, составляет 310 мкс.

При расчете потенциальной пропускной способности предполагалось, что за время сеанса связи передается большое число пакетов данных (>1000). В таком случае временем, затрачиваемым на установку соединения и на его завершение, можно пренебречь ввиду его малости. Величина окна N_W была взята равной 7, которая принята по умолчанию в протоколе TCP. Изменяя число байтов в блоке от 256 до 1460 и подставляя его в формулы (9), (4)-(8) и (1), получаем график зависимости теоретической максимальной эффективной скорости передачи данных с оконным алгоритмом V_{TCP-TW} и с

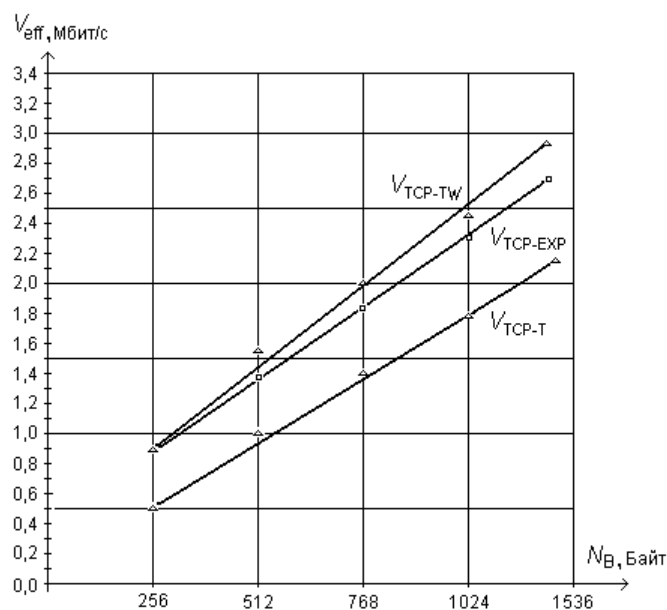


Рисунок 3 — Зависимости теоретической и реальной эффективной скорости передачи данных на транспортном уровне от размера поля данных

эффективная скорость передачи данных достаточно хорошо совпадает с данными, полученными при экспериментальных измерениях пропускной способности на реальных сетях. Отклонение реальной пропускной способности от теоретической связано с потерей пакетов за счет помех и переполнения буфера, а также передачей дублирующих пакетов.

В дальнейших исследованиях предполагается получить аналитические выражения для оценки пропускной способности сетей стандарта IEEE 802.11g/n, а также при работе беспроводной локальной сети в инфраструктурном режиме с использованием процедуры RTS/CTS — запроса на передачу данных, применяемую при наличии скрытых станций.

Бibliографический список использованной литературы

1. IEEE Standard for Wireless LAN Medium Access Control: IEEE Std 802.11b — 1999. — November 1999.
2. Pham D. Performance of IEEE 802.11b Wireless Links: An Experimental Study / D. Pham, Y. Sekercioglu, G. Egan [Электронный ресурс]. — Электрон. текстовые данные (252 Kb). — Melbourne: TENCON 2005. — Режим доступа: http://titania.ctie.monash.edu.au/papers/wlan_measurements.pdf
3. Чернега В.С. Компьютерные сети / В.С. Чернега, Б. Платтнер. — Севастополь: СевНТУ, 2006. — 500 с.

Поступила в редакцию 23.01.2012 г.

Чернега В.С., Глатц Е., Виниченко С.О. Оцінка потенційної ефективної швидкості передачі даних на транспортному рівні в мережах 802.11b

Детально проаналізована процедура обміну кадрами між клієнтськими комп'ютерами та точкою доступу безпроводної локальної комп'ютерної мережі стандарту 802.11b й отримані вирази, що дозволяють розрахувати потенційну пропускну спроможність такої мережі.

Ключові слова: безпроводні локальні мережі 802.11b, інфраструктурний режим, пропускну спроможність, транспортний рівень.

Chernega V., Glatz E., Vinichenco S. Estimation of effective data rate at transport level in networks of 802.11b

In detail procedure of exchange is analyzed by shots between client computers and point of access of computer WLAN of standard of 802.11b and expressions, allowing expecting the potential performance of such network.

Keywords: WLANS of 802.11b, TCP, UDP, effective data rate, infrastructural mode.