

УДК: 004.732

Чернега В. С.,

к.т.н., доцент,

Севастопольский государственный университет

ОЦЕНКА РЕАЛЬНОЙ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ КОМПЬЮТЕРНЫХ WiFi СЕТЕЙ НА ТРАНСПОРТНОМ УРОВНЕ

Проведен анализ способов повышения пропускной способности WiFi сетей стандартов IEEE 802.11b,g,n, функционирующих в инфраструктурном режиме. Получены выражения и графические зависимости, позволяющие оценить пропускную способность сетей на канальном и транспортном уровнях в зависимости от размера поля данных в пакетах.

Ключевые слова: беспроводные локальные сети IEEE 802.11, инфраструктурный режим, пропускная способность, транспортный уровень.

В настоящее время на практике широко используются локальные компьютерные сети на основе стандартов IEEE 802.11b,g и n [1,2,3]. Максимальная пропускная способность для этих сетей составляет соответственно 11 Мбит/с, 54 Мбит/с и 150 Мбит/с. Однако указанные в стандартах и рекламных листовках скорости, являются техническими скоростями передачи сигналов по каналам связи, которые заметно отличаются от эффективной скорости передачи информации, т.е. скорости выдачи информации получателю на приемной стороне. Снижение эффективной скорости связано с необходимостью передачи служебной информации, введением необходимых технологических пауз между кадрами, а также необходимостью повторной передачи кадров в случае возникновения коллизий или ошибок при передаче.

Проблемам теоретического расчета и измерения реальной пропускной способности в WiFi компьютерных сетях посвящен ряд публикаций. Однако в этих работах определяется пропускная способность только на канальном уровне для локальных сетей IEEE 802.11g [4], функционирующих в независимом (Ad Hoc) режиме, или на транспортном уровне только для сетей стандарта IEEE 802.11b [5], форматы кадров в которых существенно отличаются от сетей, выполненных по стандартам IEEE 802.11g и IEEE 802.11n. Детально расчет реальной пропускной способности беспроводных сетей на канальном и транспортном уровнях выполнен в работах [5-7].

Целью настоящей статьи является сравнительная оценка реальной пропускной способности WiFi сетей стандартов IEEE 802.11b,g и n на канальном и транспортном уровнях эталонной модели взаимодействия открытых систем при отсутствии коллизий и повторной передачи кадров.

Пропускная способность виртуального канала между двумя клиентскими станциями сети, созданного в процессе установления соединения на канальном и транспортном уровнях, определяется количеством полезной информации в битах N_B , выдаваемой получателю за время сеанса связи в секундах T_S , т.е. представляет собой эффективную скорость передачи данных

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

Процедура сеанса связи по транспортному 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. С учетом этого время сеанса связи представляется в следующем виде:

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

где T_C — время фазы установления соединения;

T_{DT-TCP} — время фазы передачи данных;

T_{FIN} — время фазы завершения и разъединения.

Для определения продолжительности фаз соединения, передачи данных и разъединения были построены временные диаграммы сеанса связи между двумя клиентскими компьютерами. Временные диаграммы обмена кадрами и пакетами на канальном и транспортном уровнях в процессе установления TCP-соединения приведены в [5,6]. Процедура установления соединения происходит следующим образом. Клиентская станция STA-1, обнаружив, что канал связи свободен, выдерживает обязательную паузу T_{DIFS} , по истечении которой запускается генератор случайных чисел и вычисляется 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 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, содержащим 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 короткой 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). 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). Затем аналогичным образом пакет TCP:SYN2; 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.

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 на сетевом уровне 1500 байтов. В крайнем, худшем, случае в процессе обмена информацией между клиентскими станциями 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 кадров. В реальных условиях количество непрерывно передаваемых пакетов данных без ожидания пакета подтверждения TCP:ACK зависит от ширины окна Window, максимальный размер которого может достигать 64 Кбайт, т.е. 44 пакета максимальной длины. Экспериментальные исследования показали, что количество непрерывно передаваемых пакетов в локальной беспроводной сети обычно варьируется от 2 до 6.

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 построенных 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 реального 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 регламентируется соответствующим стандартом [1]. При расчете эффективной скорости передачи данных предполагалось, что за время сеанса связи передается большое число информационных пакетов (>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 количество 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 подтверждением каждого пакета V_{TCP-T} (рисунок 1).

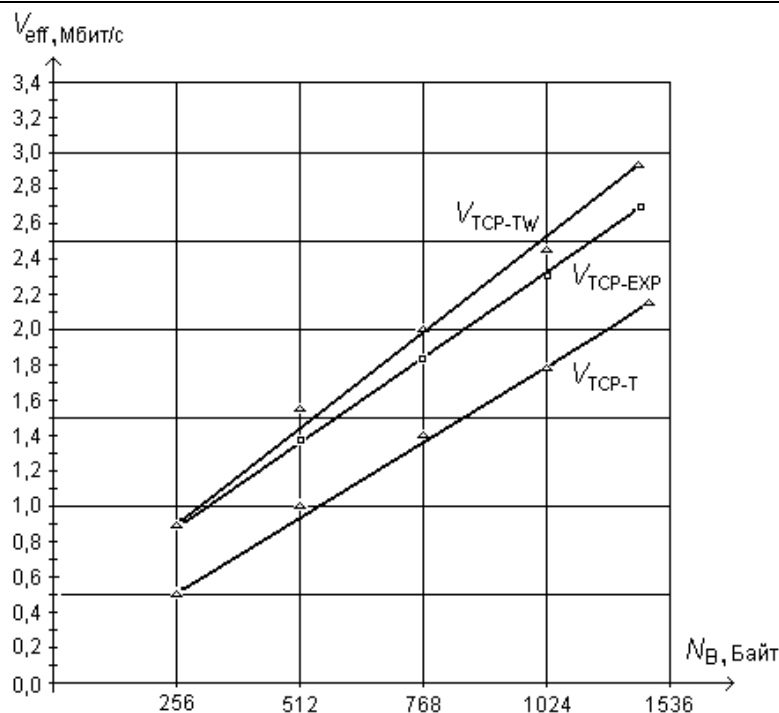


Рисунок 1 — Зависимости теоретической и реальной эффективной скорости передачи данных по стандарту IEEE 802.11b на транспортном уровне от размера поля данных

На этом же рисунке изображен график эффективной скорости передачи данных $V_{TCP-EXP}$, определенной экспериментально с использованием пакета Chariot. Детальный расчет эффективной скорости приведен в [5].

Измерение эффективной скорости производилось при технической скорости передачи 11 Мбит/с. За каждый сеанс связи передавалось 10 Мбайт текстовых сообщений. В процессе измерений изменялась длина информационной части пакета данных. Передача осуществлялась между двумя стационарными компьютерами, расположенными на расстоянии 3 м друг от друга, снабженными радиоадаптерами типа D-Link, работающих по классическому алгоритму, определяемому стандартом IEEE 802.11b. В качестве базовой станции использовалась точка доступа LinkSys WRT-54GL.

Как видно из приведенных графиков, рассчитанная по полученным формулам 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.

Для расчета интервалов времени, требуемых для передачи служебных кадров и кадров передачи данных в сетях стандарта IEEE 802.11g, был проведен анализ структуры кадров, регламентированной этим стандартом [2]. В состав любого кадра, кроме поля данных входит преамбула и служебное поле SIGNAL.

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 вычисляются соответственно по следующим формулам.

$$T_{SYN} = T_{PR} + T_{SIG} + T_{SYM} \times \left[\frac{N_{SERV} + N_{Tail} + 8(H_{MAC} + H_{SNAP} + H_{IP} + H_{TCP-SYN})}{N_{DBPS}} \right] + T_{EX}, \quad (11)$$

$$T_{ACK-MAC} = T_{PR} + T_{SIG} + T_{SYM} \times \left[\frac{N_{SERV} + N_{Tail} + 8H_{MAC}}{N_{DBPS}} \right] + T_{EX}, \quad (12)$$

$$T_{ACK-TCP} = T_{PR} + T_{SIG} + T_{SYM} \times \left[\frac{N_{SERV} + N_{Tail} + 8(H_{MAC} + H_{SNAP} + H_{IP} + H_{TCP-ACK})}{N_{DBPS}} \right] + T_{EX}, \quad (13)$$

$$T_{DATA} = T_{PR} + T_{SIG} + T_{SYM} \times \left[\frac{N_{SERV} + N_{Tail} + 8(H_{MAC} + H_{SNAP} + H_{IP} + H_{TCP} + N_{DATA})}{N_{DBPS}} \right] + T_{EX}, \quad (14)$$

где $T_{PR} = N_{PR}/V_{PR}$ — время передачи преамбулы; N_{PR} — длина преамбулы в битах; V_{PR} — скорость передачи преамбулы; T_{SIG} — длительность поля SIGNAL; T_{SYM} — длительность одного OFDM-символа; N_{SERV} — количество бит поля SERVICE; N_{Tail} — размер поля хвостовика Tail в битах; H_{MAC} , H_{IP} , H_{TCP} и H_{SNAP} — размер заголовков в байтах соответственно канального, сетевого, транспортного и SNAP уровней; N_{DBPS} — количество бит на один OFDM-символ; N_{DATA} — количество байт в поле передаваемых данных; T_{EX} — интервал расширения. Величины параметров, используемых в расчетных формулах (11-14), регламентированы стандартом IEEE 802.11g [2].

При расчете учитывалось, что управление потоком осуществляется на основе оконного алгоритма, согласно которому передатчик отправляет N_W пакетов данных, не ожидая подтверждения, а пакет подтверждения ACK-TCP отправляется на группу пакетов данных, задаваемую шириной окна N_W . В этом случае время T_{TD-TCP} передачи данных по протоколу TCP рассчитывается по формуле (9), а время T_{TD-UDP} передачи данных по протоколу UDP вычисляется по формуле (10).

Изменяя количество байтов в блоке от 256 до 1460, подставляя его в формулы (1,9) и (11-15) получаем график зависимости теоретической максимальной эффективной скорости передачи данных с оконным алгоритмом V_{TCP-W3} с передачей одного подтверждения на три переданных пакета и с подтверждением каждого пакета V_{TCP-W1} (рисунок 2). На этом же рисунке изображен график эффективной скорости передачи данных V_{UDP} по протоколу UDP. Значками \times на рисунке отмечена средняя скорость передачи данных по протоколу TCP, которая определена экспериментально с использованием пакета Chariot.

Измерение эффективной скорости производилось при технической скорости передачи 54 Мбит/с. За каждый сеанс связи передавалось 10 Мбайт текстовых сообщений. В процессе измерений изменялась длина информационной части пакета данных. Передача осуществлялась между двумя стационарными компьютерами, расположенными на расстоянии 3 м друг от друга, снабженными радиоадаптерами типа D-Link, работающих по алгоритму, определяемому стандартом IEEE 802.11g в режиме "only g". В качестве базовой станции использовалась точка доступа LinkSys WRT-54GL.

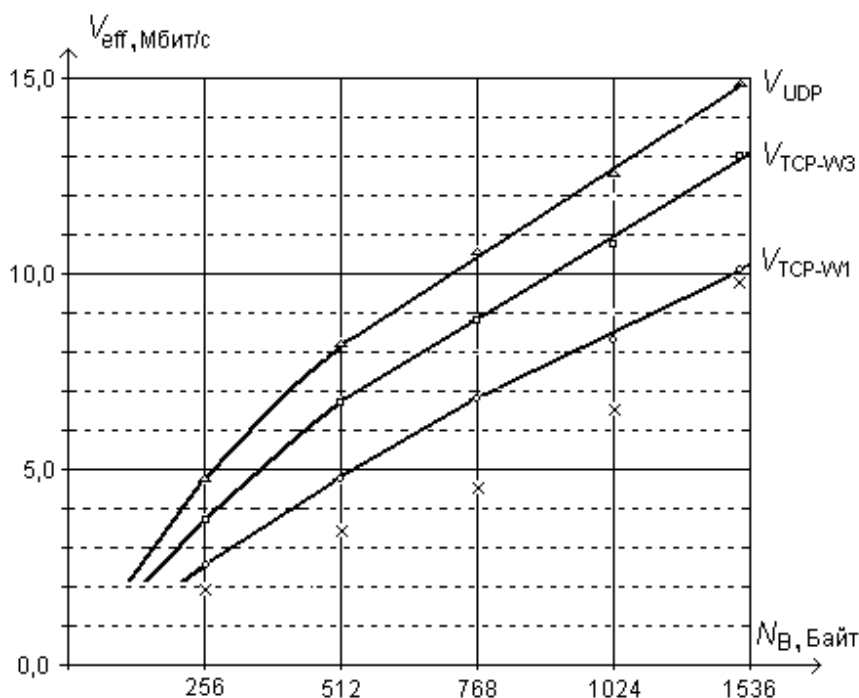


Рисунок 2 — Зависимости теоретической и реальной эффективной скорости передачи данных по стандарту IEEE 802.11g на транспортном уровне от размера поля данных

Как видно из приведенных графиков, рассчитанная по полученным формулам 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 процессе эксперимента наблюдались случаи, когда максимальная экспериментальная скорость превышала теоретическую для случая передачи кадра подтверждения на каждый переданный источником пакет ($V_{\text{TCP-W1}}$), что очевидно связано с передачей одного кадра подтверждения на несколько пакетов данных. Однако случаев превышения максимальной скорости величины $V_{\text{TCP-W3}}$ не наблюдалось.

В сетях стандарта IEEE 802.11n достигнуто существенное повышение скорости передачи данных на физическом уровне. Скорость передачи данных на этом уровне в сетях IEEE 802.11n возросла более чем на порядок по сравнению с сетями стандарта IEEE 802.11g, в частности, с 54 Мбит/с до 600 Мбит/с. Повышение скорости разработчикам удалось достигнуть в первую очередь за счет расширения полосы канала с 20 до 40 МГц и увеличения количества несущих OFDM сигналов с 48 до 53, а также применения пространственного разделения потоков данных и уменьшения в два раза защитных интервалов между символами. Однако рост пропускной способности на канальном уровне в сетях IEEE 802.11n при этом повысился по сравнению канальным уровнем сетей IEEE 802.11g всего лишь на 15%.

Для повышения пропускной способности в стандарте IEEE 802.11n на канальном уровне предусмотрено несколько способов [3]:

- а) передача группы кадров с уменьшенной, по сравнению с короткой межкадровой паузой SIFS, межкадровой паузой (RIFS) и одним подтверждением безошибочного приема всей группы;
- б) агрегированная передача кадров без межкадровых пауз с запросом группового подтверждения приема;

в) агрегированная передача кадров без межкадровых пауз с одним кадром подтверждения правильности приема агрегированного блока с неявным запросом подтверждения.

Время, затрачиваемое на передачу группы, состоящей из n кадров, и получение подтверждения приема, определяется по формуле

$$T_B = 2(T_{DIFS} + T_{BO} + nT_{DATA} + nT_{RIFS} + T_{BAR} + T_{SIFS} + T_{BA}). \quad (15)$$

Передача кадров данных, запроса подтверждения и подтверждения приема рассчитываются по следующим формулам:

$$T_{DATA} = (T_{PR} + T_{SIG} + T_{EX} + T_{SYM}) \times (N_{SERV} + N_{TAIL} + 8(H_{MAC} + H_{SNAP} + H_{IP} + H_{TCP} + N_{DATA})) / N_{DBPS}; \quad (16)$$

$$T_{BAR} = T_{PR} + T_{SIG} + T_{EX} + 8T_{SYM} \cdot N_{BAR} / N_{DBPS}; \quad (17)$$

$$T_{BA} = T_{PR} + T_{SIG} + T_{EX} + 8T_{SYM} \cdot N_{BA} / N_{DBPS}. \quad (18)$$

где T_{PR} — длительность преамбулы кадра, причем длительность короткой преамбулы равна 16 мкс;

T_{PH} — длительность заголовка на физическом уровне, равная при OFDM 4 мкс;

T_{SIG} — длительность поля SIGNAL;

T_{SYM} — длительность одного OFDM символа;

N_{SERV} — количество битов поля SERVICE; N_{DBPS} — количество битов на OFDM сигнал;

N_{Tail} — размер поля хвостовика Tail в битах;

N_{BAR} и N_{BA} — размер кадров в байтах, равных соответственно 26 и 34 байтам.

Время, затрачиваемое на передачу агрегированного пакета кадров, состоящего из кадров RTS и CTS, разделенных межкадровым интервалом SIFS, n кадров агрегированных данных A-MPDU, и кадра подтверждения группового приема BA на канальном уровне, определяется по формуле:

$$T_{S2} = 2(T_{DIFS} + T_{BO} + T_{RTS} + 3T_{SIFS} + T_{CTS} + nT_{AMPDU} + T_{BA}), \quad (19)$$

где T_{AMPDU} — время передачи блока данных с дополнительным заголовком длиной 4 байта.

Длительность кадров запроса агрегированной передачи RTS и ее подтверждения CTS рассчитывается по формулам:

$$T_{RTS} = T_{PR} + T_{SIG} + T_{EX} + 8T_{SYM} \cdot N_{RTS} / N_{DBPS}; \quad (20)$$

$$T_{CTS} = T_{PR} + T_{SIG} + T_{EX} + 8T_{SYM} \cdot N_{CTS} / N_{DBPS}. \quad (21)$$

На транспортном уровне время передачи агрегированного блока увеличивается дополнительно на время передачи подтверждения на транспортном уровне, рассчитываемого по формуле:

$$T_{ACK-TCP} = T_{PR} + T_{SIG} + T_{EX} + T_{SYM} (N_{SERV} + N_{TAIL} + 8(H_{MAC} + H_{SNAP} + H_{IP} + H_{TCP})) / N_{DBPS} \quad (22)$$

На рисунке 3 показаны графики зависимостей пропускной способности на канальном и транспортном уровнях от размера поля данных, рассчитанные по формулам (15-22) при условии, что полоса пропускания равна 20 МГц и используется один пространственный

поток, а временные интервалы имеют следующие значения: $T_{BO} = 7,5$ мкс; $T_{DIFS} = 28$ мкс; $T_{SIFS} = 10$ мкс; $T_{RIFS} = 2$ мкс; $T_{PR} = 16$ мкс; $T_{PH} = 4$ мкс; $T_{EX} = 6$ мкс при количестве битов, содержащихся в сигнальном символе $N_{DBPS} = 234$.

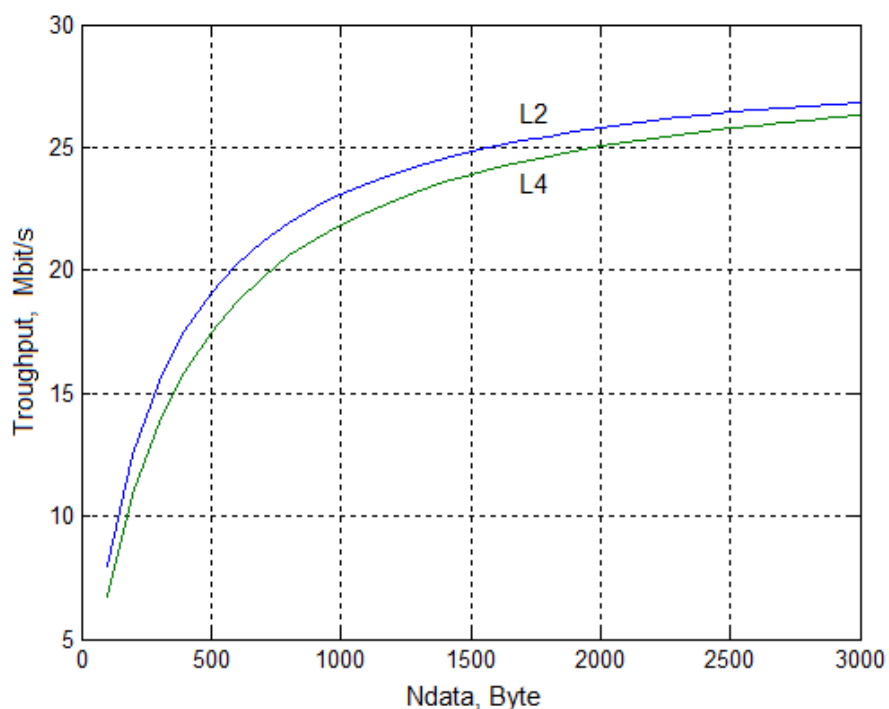


Рисунок 3 — Зависимости пропускной способности сети IEEE 802.11n на канальном (L2) и транспортном (L4) уровнях

Из графиков видно, что пропускная способность на канальном уровне почти в два раза ниже, полученной в [8], что объясняется задержкой за счет ретрансляции кадров точкой доступа. Пропускная способность на транспортном уровне дополнительно снижается примерно на 6% за счет служебных полей заголовков сетевого и транспортного уровней. Агрегирование кадров повышает пропускную способность сети на 2%.

На рисунке 4 изображены зависимости пропускной способности на канальном уровне на участке Клиент-Точка доступа-Клиент от количества блоков n , входящих в агрегированный пакет, с учетом ожидания подтверждения на транспортном уровне.

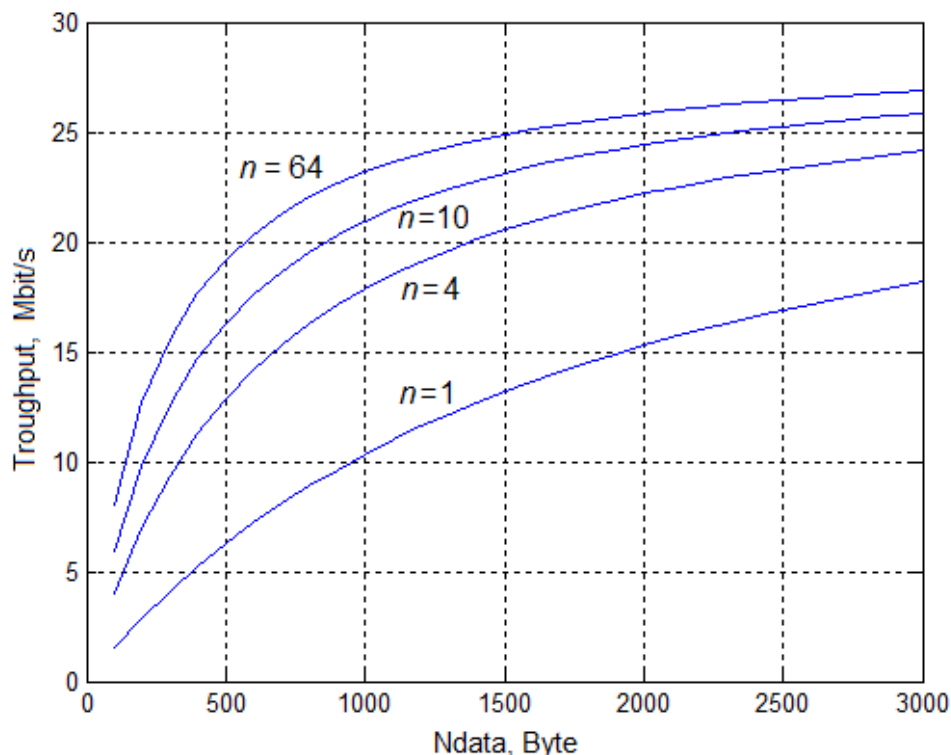


Рисунок 4 — Зависимости пропускной способности сети IEEE 801.11n на канальном уровне от количества агрегированных блоков

Как видно из рисунка 4 пропускная способность сети при максимальном количестве агрегированных блоков ($n=64$) возрастает в среднем в 2 раза по сравнению с передачей одиночных блоков данных.

Заключение

1. Получены выражения, позволяющие оценивать пропускную способность локальных сетей передачи данных WiFi стандарта IEEE 801.11b,g и n при работе с точкой доступа на канальном и транспортном уровнях.
2. Приведены зависимости теоретической и реальной эффективной скорости передачи данных в сетях WiFi по стандартам IEEE 801.11b,g и n.
3. Приведены зависимости пропускной способности сети WiFi стандарта IEEE 801.11 n при агрегировании кадров от степени агрегации и длины поля полезной информации, а также от количества агрегированных блоков данных.

Литература

1. IEEE Standard for Wireless LAN Medium Access Control: IEEE Std 802.11b —1999. — November 1999.
2. IEEE Std 802.11g —2003. [ISO/IEC 8802-11] Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications. Amendment 4: Further Higher Data Rate Extension in the 2.4 GHz Band.
3. IEEE Std 802.11n —2009. Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. Amendment 5: Enhancements for Higher Throughput.
4. Barbosa A.V. The Theoretical Maximum Throughput Calculation for the IEEE 802.11g Standard / A.V. Barbosa, M.F. Caetano, J.I. Bordim // International Journal of Computer Science and Network Security, Vol.11, No.4, April 2011. – Pp.136-142.
5. Чернега В.С. Оценка потенциальной эффективной скорости передачи данных на транспортном уровне в сетях 802.11b / В.С. Чернега, Э. Глатц, С.А. Винниченко. Вестник СевНТУ, Вып.131. — Севастополь 2012, с.32-36.

6. Чернега В. Пропускная способность транспортного уровня беспроводных локальных сетей IEEE 802.11g, функционирующих в инфраструктурном режиме // Международный журнал «Компьютинг». 2013. Т.1. №12. С.47 - 54.

7. Чернега В.С. Оценка пропускной способности на канальном и транспортном уровнях сетей 802.11n, функционирующих в инфраструктурном режиме // Материалы 26-й международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». — Москва; Севастополь, 2016. — Т. 4: с.394-400.

8. Vinkestijn A. Leistungsmessung im WLAN / Angelique Vinkestijn, Fabian Beck // Bachelorarbeit. HSR, 2013. – 182 S.