

Оценка эффективной скорости передачи данных в сетях Wi-Fi

при наличии коллизий

В статье представлен анализ способов повышения пропускной способности сетей Wi-Fi стандартов IEEE 802.11n, функционирующих в инфраструктурном режиме. Приведены формулы для оценки эффективной скорости передачи данных в указанных сетях с учетом повторной передачи кадров за счет коллизий и наличия ошибок в принятых кадрах, а также зависимости эффективной скорости от вероятности повторной передачи при различной длине поля полезной информации.

Виктор Чернега
v_chernega@rambler.ru

Введение

Реальная пропускная способность (эффективная скорость передачи данных) компьютерных Wi-Fi-сетей на транспортном уровне существенно отличается от скорости передачи на физическом уровне. Снижение пропускной способности связано с необходимостью передачи служебной информации, введением обязательных 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 компьютерных сетях Wi-Fi на транспортном уровне посвящен ряд публикаций [1, 2]. Однако в этих работах определяется пропускная способность при условии отсутствия повторных передач кадров за счет коллизий и ошибок. В [3] проведена оценка пропускной способности сетей Wi-Fi при наличии коллизий при условии насыщенных сетей, что характерно для беспроводных сетей крупных организаций и предприятий. Расчетные соотношения, приведенные в статье, громоздки и мало пригодны для практического использования.

Целью настоящей статьи является оценка реальной пропускной способности сетей Wi-Fi стандартов IEEE 802.11n малых офисов и домашних сетей на канальном и транспортном уровнях эталонной модели взаимодействия открытых систем при наличии коллизий и повторной передачи кадров.

Расчет времени передачи кадров

В современных беспроводных сетях стандарта IEEE 802.11n 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 скорость передачи сигналов на физическом уровне возросла более чем на порядок по сравнению с сетями стандарта IEEE

802.11g, в частности, с 54 Мбит/с до 600 Мбит/с. Однако рост пропускной способности на канальном уровне в сетях IEEE 802.11n при этом повысился по сравнению с канальным уровнем сетей IEEE 802.11g всего лишь на 15%. Поэтому для повышения пропускной способности в стандарте IEEE 802.11n на канальном уровне предусмотрено несколько способов [4]:

- 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.

Для беспроводных сетей малых офисов характерно состояние ненасыщенной сети, при котором буферы передачи редко оказываются заполненными одновременно во всех беспроводных станциях сети. Однако в процессе обмена кадрами не исключаются коллизии и ошибочный прием кадров. При этом предполагается, что вероятность повторных коллизий и вероятность приема двух подряд ошибочных кадров пренебрежимо мала.

Эффективная скорость передачи данных между двумя клиентскими станциями сети с ретрансляцией через точку доступа при передаче группы кадров или их агрегировании 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.

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

Процедура сеанса связи по транспортному протоколу TCP между двумя клиентскими станциями STA-1 и STA-2 через точку доступа (Access

Point, 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:

$$T_S = T_C + T_B + T_{FIN} \quad (2)$$

где: T_C — время фазы установления соединения; T_B — время передачи блока информационных пакетов данных; T_{FIN} — время фазы завершения и разъединения.

В связи с тем что за время сеанса связи передается большое число информационных пакетов (>1000), то временем, затрачиваемым на установку соединения и на его завершение, можно пренебречь ввиду его малости. В этом случае время сеанса связи при передаче n блоков данных с укороченной межкадровой паузой определяется следующим выражением [2]:

$$T_S \approx T_B = 2(T_{DIFS} + T_{BO} + nT_{DATA} + nT_{RIFS} + T_{BAR} + T_{SIFS} + T_{BA}), \quad (3)$$

где: T_{DIFS} , T_{SIFS} и T_{RIFS} — время межкадровых пауз DIFS, SIFS и RIFS соответственно; T_{BO} — время обратного отсчета; T_{BAR} — время передачи кадра запроса подтверждения приема блока кадров; T_{BA} — время передачи кадра подтверждения группового приема ВА.

Станция, отправившая очередной кадр получателю, ожидает в течение определенного временного интервала кадра подтверждения правильности его приема. При искажении переданного кадра вследствие коллизии или при обнаружении в нем ошибок получатель не посылает кадр подтверждения, и станция-отправитель вынуждена повторить предыдущий информационный кадр снова. Время сеанса связи в этом случае оценивается следующим образом:

$$T_S \approx T_B + P_R T_B = T_B(1 + P_C + P_E - P_C P_E), \quad (4)$$

где: P_R — вероятность повторной передачи блока кадров; P_C — вероятность коллизии кадров; P_E — вероятность ошибочного приема кадра, равная вероятности ошибки приема OFDM-сигнала.

В многоквартирных домах в настоящее время практически в каждой квартире имеется собственная беспроводная компьютерная сеть, и по причине их высокой плотности ряд из них работают на одной и той же несущей частоте, создавая помехи соседним сетям. За счет искажения символов возрастает вероятность ошибочного приема кадров, вероятность которого зависит от отношения сигнал/помеха. Для оценки P_E на практике целесообразно воспользоваться зависимостями вероятности ошибочного приема OFDM-сигнала от отношения энергии сигнала к спектральной плотности помехи ρ_o , приведенными в [5].

Передача кадров данных на транспортном уровне, запроса подтверждения и подтверждения приема рассчитывается по следующим формулам [2]:

$$T_{DATA} = T_{PR} + T_{SIG} + T_{EX} + T_{SYM}(N_{SERV} + N_{TAIL} + 8(H_{MAC} + H_{SNAP} + H_{IP} + H_{TCP} + N_{DATA})) / N_{DBPS}, \quad (5)$$

$$T_{BAR} = T_{PR} + T_{SIG} + T_{EX} + 8T_{SYM} N_{BAR} / N_{DBPS}, \quad (6)$$

$$T_{BA} = T_{PR} + T_{SIG} + T_{EX} + 8T_{SYM} N_{BA} / N_{DBPS}, \quad (7)$$

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_{EX} — длительность сигнального расширения, равная 6 мкс; 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 байт.

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

$$T_{S2} = 2(T_{DIFS} + T_{BO} + T_{RTS} + 3T_{SIFS} + T_{CTS} + nT_{AMPDU} + T_{BA}), \quad (8)$$

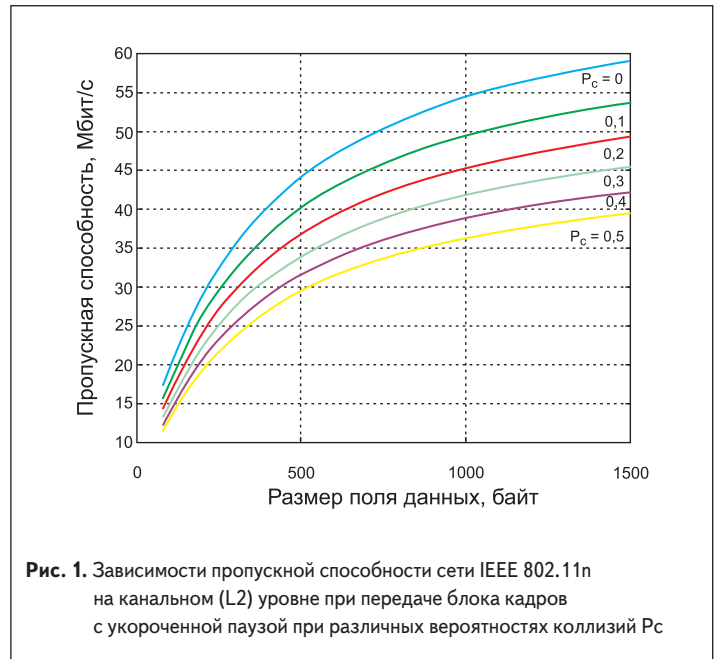


Рис. 1. Зависимости пропускной способности сети IEEE 802.11n на канальном (L2) уровне при передаче блока кадров с укороченной паузой при различных вероятностях коллизий P_c

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

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

$$T_{RTS} = T_{PR} + T_{SIG} + T_{EX} + 8T_{SYM} \times N_{RTS} / N_{DBPS}, \quad (9)$$

$$T_{CTS} = T_{PR} + T_{SIG} + T_{EX} + 8T_{SYM} \times N_{CTS} / N_{DBPS}. \quad (10)$$

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

$$T_{ACK-TCP} = T_{PR} + T_{SIG} + T_{EX} + T_{SYM}(N_{SERV} + N_{TAIL} + 8(H_{MAC} + H_{SNAP} + H_{IP} + H_{TCP})) / N_{DBPS}. \quad (11)$$

На рис. 1 показаны графики зависимостей пропускной способности на канальном уровне от размера поля данных при различных вероятностях ошибочного приема при передаче блока кадров с укороченной паузой, рассчитанные по формулам (4–7), а на рис. 2 — графики зависимостей пропускной способности на транспортном

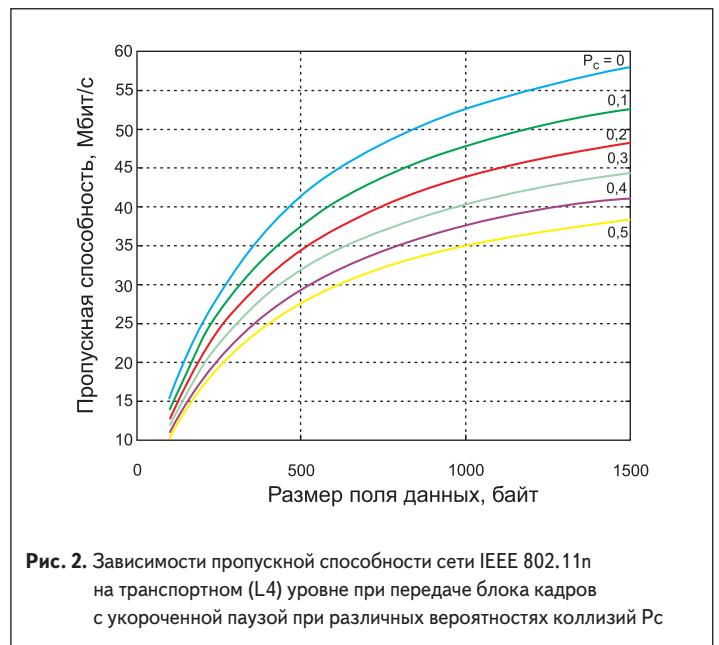
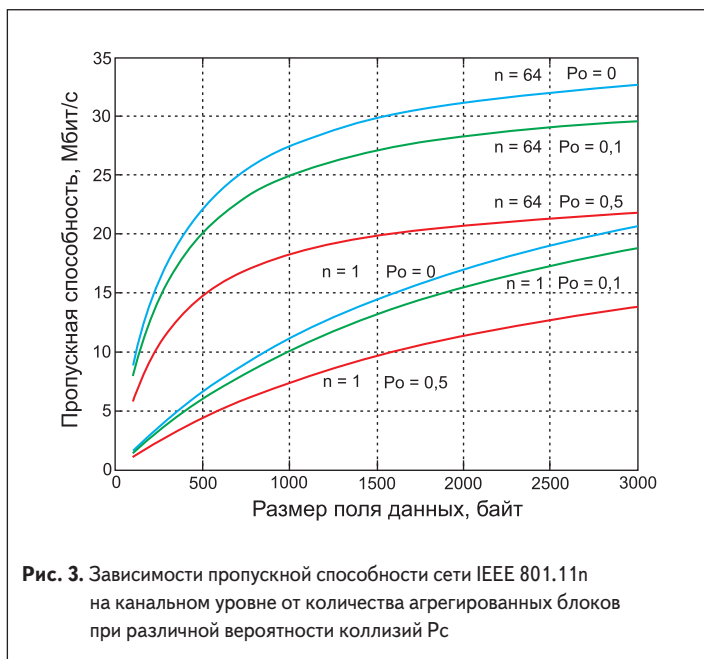


Рис. 2. Зависимости пропускной способности сети IEEE 802.11n на транспортном (L4) уровне при передаче блока кадров с укороченной паузой при различных вероятностях коллизий P_c



уровне от размера поля данных при различных вероятностях ошибочного приема, рассчитанные по формулам (4–11), при условии, что полоса пропускания канала 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, $N_{DBPS} = 288$.

На рис. 3 изображены зависимости пропускной способности на канальном уровне на участке «клиент–АР-клиент» от количества блоков n , входящих в агрегированный пакет, с учетом ожидания подтверждения на транспортном уровне при различной вероятности коллизий.

Графики показывают, что пропускная способность на канальном уровне почти в два раза ниже полученной в [6], что объясняется задержкой за счет ретрансляции кадров АР. Пропускная способность

на транспортном уровне дополнительно снижается примерно на 6% за счет служебных полей заголовков сетевого и транспортного уровней. Таким образом, пропускная способность сети при максимальном количестве агрегированных блоков ($n = 64$) возрастает в среднем в два раза по сравнению с передачей одиночных блоков данных, однако при наличии коллизий эффективная скорость снижается примерно на 30% при максимально допустимом количестве агрегированных кадров.

Эффективная скорость передачи данных при передаче блока кадров с укороченной межкадровой паузой и однократным подтверждением при наличии одиночных коллизий с вероятностью 0,5 снижается на 30%.

Заключение

Получены выражения, позволяющие оценивать пропускную способность локальных сетей передачи данных стандарта IEEE 801.11n при работе с точкой доступа на канальном и транспортном уровнях при наличии коллизий и ошибок в принятых кадрах. Приведены зависимости пропускной способности при агрегировании кадров от степени агрегации и длины поля полезной информации, от количества агрегированных блоков данных, а также от вероятности коллизий кадров. ■

Литература

1. Чернега В. Пропускная способность транспортного уровня беспроводных локальных сетей IEEE 802.11g, функционирующих в инфраструктурном режиме // Компьютинг. 2013. Т.1. № 12.
2. 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.
3. Bianchi G. Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function. IEEE Journal on Selected Areas in Communications. Vol. 18 Is. 3. September, 2006.
4. IEEE Std 802.11n–2009. Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. Amendment 5: Enhancements for Higher Throughput.
5. Ермолаев В. Т. Флакман А. Г. Теоретические основы обработки сигналов в системах мобильной радиосвязи. www.unn.ru/pages/e-library/methodmaterial/2010/56.pdf
6. Vinkestijn A. Leistungsmessung im WLAN / Angelique Vinkestijn, Fabian Beck // Bachelorarbeit. HSR, 2013.