

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КАНАЛА И МЕТОД ОПТИМИЗАЦИИ ЧИСЛА КАДРОВ В БЛОКЕ A-MSDU ДЛЯ СЕТИ IEEE 802.11ac

Викулов Антон Сергеевич

аспирант кафедры сетей связи и передачи данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича.
E-mail: asv012016@gmail.ru.

Парамонов Александр Иванович

доктор технических наук, профессор кафедры сетей связи и передачи данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича.
E-mail: alex-in-spb@yandex.ru.

Адрес: 193232, г. Санкт-Петербург, пр. Большевиков, 22/1.

Аннотация: В данной статье проведён обзор существующих методов агрегирования кадров и рассмотрено влияние механизма агрегирования кадров A-MSDU на эффективность функционирования ячейки сети для стандарта IEEE 802.11. Предложена модель данного механизма, связывающая его основные параметры с условиями применения. Получена аналитическая модель для зависимости вероятности успешного приёма кодового слова от вероятности битовой ошибки. Также получена аналитическая модель зависимости эффективности использования канала от числа кадров в блоке A-MSDU и вероятности битовой ошибки для стандарта IEEE 802.11ac. Предложенные аналитические модели могут быть использованы для оценки эффективности сети в задачах проектирования новых и анализа работы существующих беспроводных локальных вычислительных сетей (БЛВС). Предложен метод определения оптимального числа кадров в блоке A-MSDU с точки зрения максимальной эффективности использования канального ресурса.

Ключевые слова: беспроводная сеть доступа, IEEE 802.11ac, агрегирование кадров, A-MSDU, эффективность использования канала, схема модуляции и кодирования, время передачи кадра.

Введение

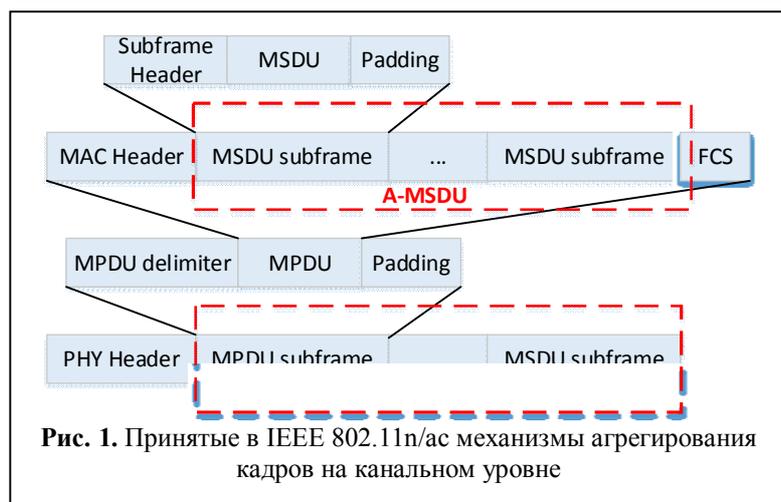
Одной из основных целей нововведений в группе стандартов IEEE 802.11 является повышение скорости передачи данных и эффективности использования радиоресурсов для повышения качества оказания услуг связи. Под эффективностью использования канала передачи данных будем понимать отношение фактически имевшей место скорости передачи полезных данных к номинальной скорости модуляции и кодирования.

В сетях Wi-Fi ключевым ресурсом является время занятия среды распространения, в течение которого все клиенты, проассоциированные с точкой доступа (ТД), по очереди осуществляют передачу. Однако, ввиду ощутимых накладных расходов на передачу, кадры не передаются поодиночке. Вместо этого используются различные механизмы агрегирования кадров с целью повышения эффективности

использования радиочастотного ресурса. Ниже будет рассмотрен механизм агрегирования кадров A-MSDU для версии стандарта IEEE 802.11-2016 [1].

Стандарт предполагает три механизма агрегирования кадров. Сверху вниз по модели OSI: A-MSDU, A-MPDU и A-PPDU. Последний применяется только в сетях дополнения 802.11ad (DMG-сети) и здесь рассматриваться не будет. Что касается различий между A-MPDU и A-MSDU в дополнениях 802.11n и 802.11ac, то рассмотрим их более детально.

Пакет, переданный с уровня L3 на уровень MAC, попадает на подуровень MAC-LLC (logical link control layer) или upper MAC. Иначе это называется MAC service access point (MAC-SAP). Рассматриваемый в таком ключе кадр (MAC service data unit – MSDU) – это единица передачи, используемая на MAC-уровне, при приёме с вышестоящего



уровня. В результате агрегирования MSDU напрямую на MAC-уровне, конструируются блоки Aggregated MSDU (A-MSDU) [2]. A-MSDU передаются на нижележащий физический уровень (PHY-уровень), где они обрабатываются как MPDU. Каждый A-MSDU содержит общий заголовок для нескольких кадров MSDU, которые назначены одному клиенту и относятся к одному классу сервиса 802.11e. Каждый MSDU (кроме последнего) при агрегировании дополняется до размера кратного 4 байтам.

В дополнении стандарта 802.11n размер A-MSDU был ограничен 3839 или 7935 байт, в зависимости от соответствующего значения таблицы HT Capability Information [1]. В дополнении стандарта 802.11ac размер A-MSDU ограничен максимальным размером MPDU, равным 11454 байта. Число MSDU внутри A-MSDU может быть равным 8, 16, 32 или не иметь ограничений в зависимости от соответствующего значения таблицы Extended Capabilities Element [1].

Основная цель этого режима агрегирования состоит в том, что, поскольку для подавляющего большинства клиентов ethernet является исходным форматом кадров, представляется удобным объединять в рамках одной передачи несколько кадров, адресованных одному клиенту, для формирования одного A-MSDU. Т.е. оптимизируются накладные расходы на заголовки канального уровня, которые для од-

ного клиента идентичны для большого числа кадров.

Дополнением к данному механизму в стандарте, начиная с расширения стандарта IEEE 802.11n, является более низкоуровневый, относительно предыдущего, механизм агрегирования A-MPDU. Оба механизма с точки зрения канального уровня приведены на рис. 1.

MAC Protocol Data Unit (MPDU) – это блоки данных, переданные с MAC-уровня на уровень PHY. В

дополнении стандарта 802.11n размер MPDU ограничен значением в 4095 байт. В дополнении стандарта 802.11ac размер MPDU может быть ограничен значениями 3895, 7991 и 11454 байт в зависимости от соответствующего значения таблицы VHT Capability Information. Aggregated MPDU (A-MPDU) [1] – это агрегированные MPDU, объединённые в один блок физического уровня (physical protocol data unit – PPDU). Все кадры имеют общий PLCP-заголовок и преамбулу. Кадр A-MPDU структурно состоит из нескольких субкадров A-MPDU, каждый из которых включает в себя кадр MPDU delimiter и опционально – кадр MPDU.

В дополнении стандарта 802.11n размер A-MPDU ограничен в зависимости от соответствующего значения поля A-MPDU Parameters и может составлять максимально 65535 байт. В дополнении стандарта 802.11ac размер A-MPDU ограничен в зависимости от соответствующего значения поля Maximum A-MPDU Length exponent из таблицы VHT Capability Information [1] и может составлять максимально 1048575 байт.

A-MPDU, или (в терминах физического уровня) – PSDU (PHY Service Data Unit), передаётся внутри PPDU (PLCP Protocol Data Unit). Поэтому наибольший размер PPDU для 802.11n равен 65535 байт, а для 802.11ac – 4692480 байт. Стандарт запрещает передавать PPDU с длительностью передачи более 10 мс для 802.11n и более 5484 мкс для

802.11ac. Дополнительно на длительность A-MPDU могут быть наложены ограничения длительности в соответствии с требуемой AC (access category) 802.11e.

Стандарт IEEE 802.11n предполагает использование A-MPDU и A-MSDU совместно или по отдельности [1]. Стандарт IEEE 802.11ac всегда использует A-MPDU, даже если нужно передать только один MPDU. Иными словами, агрегирование кадров по механизму A-MSDU является в актуальном стандарте опциональным.

Постановка задачи

Основным недостатком механизма A-MSDU является тот факт, что вся последовательность кадров становится, по сути, одним элементом данных (PDU) и таким образом имеет только одну CRC-проверку. Поскольку с увеличением размера кадра увеличивается вероятность ошибки, а повторная передача части A-MSDU последовательности невозможна, то результатом ошибки является повторная передача всего агрегированного блока на более низких скоростях, что минимизирует преимущества агрегирования. A-MPDU, в свою очередь, состоит из нескольких PDU, каждый со своим CRC. Следовательно, в случае ошибки, PDU могут быть повторно переданы по отдельности, тем самым повышая общую эффективность. Однако, выигрыш в производительности несёт «накладные расходы» в виде дополнительного MAC-заголовка для каждого субкадра.

Иными словами, в механизмах A-MPDU и A-MSDU уменьшаются различные накладные расходы. A-MSDU уменьшает накладные расходы на MAC-заголовки в условиях хорошего качества канала связи. В противном случае увеличение доли ошибок в канале выливается в увеличение числа повторов целых блоков A-MSDU. С другой стороны A-MPDU не уменьшает накладные расходы канального уровня. Вместо этого он снижает накладные расходы CSMA/CA – IFS, ACK, DIFS и back-off. Поскольку MPDU внутри A-MPDU остаются независимыми, ошибки при передаче

влияют только на конкретные MPDU. В итоге, в дополнении стандарта 802.11n выбор между A-MPDU и A-MSDU представляет собой баланс между вероятностью ошибки и ценой повторной передачи в A-MSDU с одной стороны, и накладных расходов на заголовки MAC в A-MPDU с другой. В большинстве реальных систем последнее является более важным, и потому большая часть реальных устройств стандарта IEEE 802.11n применяет A-MPDU [3].

Основопологающей работой по моделированию канального уровня IEEE 802.11 является исследование [4]. В исследованиях [5–6] рассматривались вопросы выбора режима передачи для сетей IEEE 802.11. В работе [7] убедительно показаны недостатки механизма A-MSDU с позиции общей пропускной способности беспроводных локальных вычислительных сетей (БЛВС) как с позиций идеальных условий, так и в случае возможных ошибок передачи. В результате для стандарта 802.11n были получены зависимости пропускной способности от числа кадров в агрегированном блоке, размера кадров и PER (Packet error rate). При этом достаточно убедительно было показано, что режим агрегирования A-MPDU полезно применять во всех случаях, а агрегирование A-MSDU полезно только в случае достаточно низкой доли ошибок приёма/передачи. Данная тема была развита в нескольких работах, например [8], где применён тот же подход с рядом особенностей. Например, в [9] рассматривается гибридная работа механизмов агрегирования кадров, а в [10] изучается работа для multicast трафика в сетях IEEE 802.11n. Симуляция механизмов агрегирования кадров для сетей 802.11n рассмотрена в частности в работах [11] и [12], причём в последней изучено влияние различного числа станций, участвующих в работе сети.

В конечном итоге, логичным развитием этих идей в дополнении стандарта 802.11ac стало использование механизма A-MPDU во всех случаях (даже для передачи одного кадра). При этом механизм A-MSDU остаётся оп-

циональным, в зависимости от условий работы. Недостающим звеном во всех названных работах является с одной стороны слабое внимание последней ревизии стандарта, а с другой – недостаточное внимание к природе трафика.

Цель данной работы – построение модели режима агрегирования A-MSDU в зависимости от состояния канала передачи, а также оценка пределов применимости этого механизма для дополнения стандарта 802.11ac с одновременным поиском оптимального режима его работы в зависимости от размера кадров и их числа в блоке A-MSDU.

Предлагаемая модель

Рассмотрим эффективность использования ресурса радиочастотного канала с позиции режимов агрегирования кадров. Сначала рассмотрим идеальный случай для механизма A-MSDU и UDP-трафика. Стандарт [1] определяет время передачи кадра с данными в зависимости от размера кадра L_{MSDU} и режима работы следующим образом:

$$T_{PHY-PREAMBLES} + T_{SYML} \times \left[\frac{T_{SYMS}}{T_{SYML}} \cdot \left[\frac{8 \cdot L_{MSDU} + N_{Service}}{N_{DBPS}} \right] \right], \quad (1)$$

где $T_{PHY-PREAMBLES}$ – общая длительность передачи преамбул физического уровня; N_{DBPS} – число бит полезной нагрузки на OFDM символ; T_{SYMS} и T_{SYML} – длительности передачи одного символа соответственно при коротком и длинном защитном интервале; $N_{Service}$ – размер поля «Service», составляющий 16 бит.

Время передачи блока A-MSDU составляет:

$$T_{A-MSDU} = T_{PHY-PREAMBLES} + T_{MAC} + K \cdot (T_{A-MSDU-Header} + T_{MSDU}) + T_{SIFS} + T_{ACK}, \quad (2)$$

где K – число кадров с полезной нагрузкой; T_{SIFS} – длительность короткого межкадрового интервала, равного 16 мкс для VHT канала; T_{MSDU} – время передачи отдельного кадра; $T_{A-MSDU-Header} = \frac{112 \text{ бит}}{PHYRate}$ – длительность передачи A-MSDU заголовка длиной 112 бит;

$T_{ACK} = \frac{112 \text{ бит}}{PHYRate}$ – длительность передачи ACK

кадра длиной 112 бит; $T_{MAC} = \frac{272 \text{ бит}}{PHYRate}$ – длительность передачи MAC-заголовка длиной 272 бита.

Под $PHYRate$ будем понимать скорость передачи данных в Мбит/с, задаваемую индексом MCS, т.е. скорость кодирования и модуляции. При этом время передачи отдельного кадра MSDU для одного пространственного потока составляет:

$$T_{MSDU} = T_{SYML} \cdot \left[\frac{T_{SYMS}}{T_{SYML}} \cdot \left[\frac{8 \cdot L_{MSDU} + N_{Service}}{N_{DBPS}} \right] \right]. \quad (3)$$

Считая, что все кадры с полезными данными имеют одинаковый размер, определим общую пропускную способность как:

$$THPT = \frac{K \cdot L_{MSDU}}{T_{DIFS} + T_{BO} + T_{A-MSDU}}, \quad (4)$$

где T_{BO} – средний back-off интервал; T_{DIFS} – длинный межкадровый интервал, равный 34 мкс для VHT канала. Объединяя (2) и (4), определим эффективность использования радиоканала в идеальных условиях следующим образом:

$$ChUtil = \frac{THPT}{PHYRate} = \frac{K \cdot 8 \cdot L_{MSDU}}{T_{A-MSDU} + T_{BO} + DIFS} \cdot \frac{1}{PHYRate}. \quad (5)$$

Теперь рассмотрим случай для канала, имеющего определённую вероятность битовой ошибки. Обозначим как p_{BIT} – вероятность ошибочного приёма одного бита (или иначе, Bit error rate – BER) и будем считать эту вероятность постоянной.

Чтобы кадр был отброшен приёмником как принятый с ошибкой, достаточно одного ошибочного кодового слова LDPC, содержащего число фактически передаваемых бит равное CW_{size} . Вероятность ошибочного приёма кодового слова определяется скоростью кодирования, задаваемой выбранным индексом MCS. Стандарт предусматривает три варианта для размера кодового слова: 648, 1296 и 1944 бита

с различным объёмом полезной передаваемой информации в зависимости от выбранной скорости кодирования. Число кодовых слов N_{CW} , необходимых для передачи одного кадра с данными размером L_{MSDU} (байт), определяется в соответствии с [1] следующим образом. Число кодовых слов равно единице для N_a не более 1944, равно двум для $1944 < N_a \leq 2592$, и, наконец,

$$N_{CW} = \left\lceil \frac{8 \cdot L_{MSDU} + 16}{1944 \cdot Rate} \right\rceil \quad (6)$$

для N_a более 2592.

При этом, число доступных бит в минимальном числе OFDM символов N_a определяется как:

$$N_a = N_{CBPS} \cdot N_{SYM} = N_{CBPS} \cdot \left\lceil \frac{8 \cdot L_{MSDU} + 16}{N_{CBPS} \cdot Rate} \right\rceil, \quad (7)$$

где N_{CBPS} – число кодированных бит на OFDM символ. При этом согласно [1], размер кодового слова CW_{size} выбирается следующим образом:

$$CW_{size} = \begin{cases} 648 & C1; \\ 1296 & C2; \\ 1944 & C3; \end{cases} \quad (8)$$

где условия C1, C2 и C3 определяются как:

$$C1 = (N_a \leq 648) \wedge (N_a < 8L_{MSDU} + 16 + 912(1 - R)); \quad (9)$$

$$C2 = \begin{cases} (N_a \leq 648) \wedge \\ \wedge (N_a \geq 8L_{MSDU} + 16 + 912(1 - R)); \\ (648 < N_a \leq 1296) \wedge \\ \wedge (N_a < 8L_{MSDU} + 16 + 1464(1 - R)); \\ (1944 < N_a \leq 2592) \wedge \\ \wedge (N_a < 8L_{MSDU} + 16 + 2916(1 - R)); \end{cases} \quad (10)$$

$$C3 = \begin{cases} (648 < N_a \leq 1296) \wedge \\ \wedge (N_a \geq 8L_{MSDU} + 16 + 1464(1 - R)); \\ 1296 < N_a \leq 1944; \\ (1944 < N_a \leq 2592) \wedge \\ \wedge (N_a \geq 8L_{MSDU} + 16 + 2916(1 - R)); \\ N_a > 2592. \end{cases} \quad (11)$$

Поскольку

$$N_{CBPS} = \frac{N_{DBPS}}{Rate}, \quad (12)$$

получаем

$$N_a = \frac{N_{DBPS}}{R} \cdot \left\lceil \frac{8 \cdot L_{MSDU} + 16}{N_{DBPS}} \right\rceil. \quad (13)$$

Рассматривая формулы (6–13) совместно, получаем число и размер кодовых слов для заданной скорости кодирования R , определяемой индексом MCS, и заданного размера кадра L_{MSDU} .

Ввиду того, что вероятность пропуска ошибки передачи вышестоящим механизмом MAC-уровня (CRC-32) крайне мала и составляет $0,5^{32} = 2,3 \cdot 10^{-10}$, а также, поскольку на уровне MAC коррекция ошибки не осуществляется, будем считать, что вероятности ошибки приёма отдельного кадра на канальном и физическом уровнях равны. Иными словами, не будем отдельно рассматривать случай пропуска ошибки в кодовом слове LDPC.

Минимальное кодовое расстояние d – это минимальное количество искажённых символов, необходимых для перехода между разрешёнными комбинациями в пределах кодового слова. Код может исправлять до t ошибок, если d не менее чем $2t + 1$. Тогда успешно принятым кодовым словом будет являться кодовое слово, где число битовых ошибок не превышает величину

$$t = \left\lfloor \frac{d - 1}{2} \right\rfloor. \quad (14)$$

В работе [13] приведены оценки минимального кодового расстояния для LDPC кода, применённого в стандарте IEEE 802.11n и (как следствие) 802.11ac. См. таблицу 1.

Поскольку вероятность битовой ошибки p_{BIT} – величина постоянная, вероятность успешного приёма одного бита будет составлять $q = 1 - p_{BIT}$. Тогда, согласно теореме Бернулли, вероятность успешного приёма кодового слова P_{CW} общим размером CW_{size} бит определяется как сумма вероятностей успешного приёма

Таблица 1. Минимальное кодовое расстояние d и предельное число t битовых ошибок в кодовом слове для LDPC кода.

Скорость кодирования R	Фактический размер кодового слова LDPC CW_{size} , бит					
	648		1296		1944	
	d	t	d	t	d	t
1/2	15	7	23	11	27	13
2/3	12	5	14	6	17	8
3/4	8	3	10	4	12	5
5/6	8	3	9	4	10	4

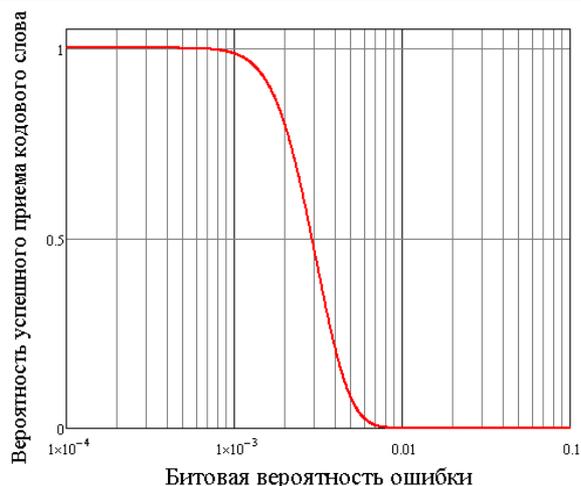


Рис. 2. Зависимость вероятности успешного приёма кодового слова от битовой вероятности ошибки

кодовых слов этого размера с числом ошибочных бит k равным от 0 до t :

$$\begin{aligned}
 P_{CW} &= \sum_{k=0}^t P_{CW_{size}}(k) = \\
 &= \sum_{k=0}^t C_{CW_{size}}^k p_{BIT}^k (1 - p_{BIT})^{CW_{size}-k} = \\
 &= \sum_{k=0}^t \frac{CW_{size}!}{k!(CW_{size}-k)!} \cdot p_{BIT}^k (1 - p_{BIT})^{CW_{size}-k} = \\
 &= (1 - p_{BIT})^{CW_{size}} + \\
 &+ \sum_{k=1}^t \frac{\prod_{i=0}^{k-1} (CW_{size} - i)}{k!} \cdot p_{BIT}^k (1 - p_{BIT})^{CW_{size}-k}. \quad (15)
 \end{aligned}$$

Формула (15) даёт вероятность успешного приёма кодового слова в зависимости от его размера, скорости кодирования, определяющей параметр t , и вероятности битовой ошибки. Для примера на рис. 2 приведена зависимость вероятности успешного приёма кодового слова от битовой вероятности ошибки для MCS5 и $L_{MSDU} = 700$ Байт.

Поскольку для потери кадра достаточно потери хотя бы одного кодового слова из их общего числа N_{CW} , определяемого в соответствии с (6), а вероятность его потери постоянна и равна $1 - P_{CW}$, то вероятность p_{MSDU} потери кадра MSDU в зависимости от числа кодовых слов определяется формулой:

$$p_{MSDU} = 1 - P_{CW}^{N_{CW}}. \quad (16)$$

Объединяя (15) и (16), получаем вероятность потери кадра MSDU для выбранной MCS, заданной вероятности битовой ошибки и размера кадра MSDU.

Теперь вероятность p_{A_MSDU} потери блока кадров A-MSDU:

$$p_{A_MSDU} = 1 - (1 - p_{MSDU})^K, \quad (17)$$

где K – число кадров с данными в пределах блока, аналогично (2). Тогда:

$$\begin{aligned}
 p_{A_MSDU} &= 1 - (1 - (1 - P_{CW}^{N_{CW}}))^K = \\
 &= 1 - P_{CW}^{N_{CW} \cdot K}. \quad (18)
 \end{aligned}$$

Вероятность, что n -ая последовательная передача блока A-MSDU будет успешной, равна $(1 - p_{A_MSDU}) \cdot p_{A_MSDU}^{n-1}$. Допустим, что повторные передачи блоков A-MSDU производятся без изменения режимов передачи (индексов MCS). В итоге, предполагаемое число повторов A-MSDU, осуществлённых прежде, чем будет иметь место успешная передача A-MSDU, составляет:

$$\begin{aligned}
 &\sum_{i=1}^{\infty} ((1 - p_{A_MSDU}) \cdot p_{A_MSDU}^{i-1} \cdot i) = \\
 &= \frac{1}{1 - p_{A_MSDU}} = \frac{1}{P_{CW}^{N_{CW} \cdot K}}, \quad (19)
 \end{aligned}$$

откуда общая пропускная способность:

$$THPT = \frac{K \cdot 8 \cdot L_{MSDU} \cdot P_{CW}^{N_{CW} \cdot K}}{DIFS + T_{BO} + T_{A_MSDU}}. \quad (20)$$

С учётом (2), (3) и (5), получаем:

$$\begin{aligned}
 ChUtil &= \frac{THPT}{PHYRate} = \\
 &= \frac{K \cdot 8 \cdot L_{MSDU} \cdot P_{CW}^{N_{CW} \cdot K}}{T_{A_MSDU} + T_{BO} + DIFS} \cdot \frac{1}{PHYRate}. \quad (21)
 \end{aligned}$$

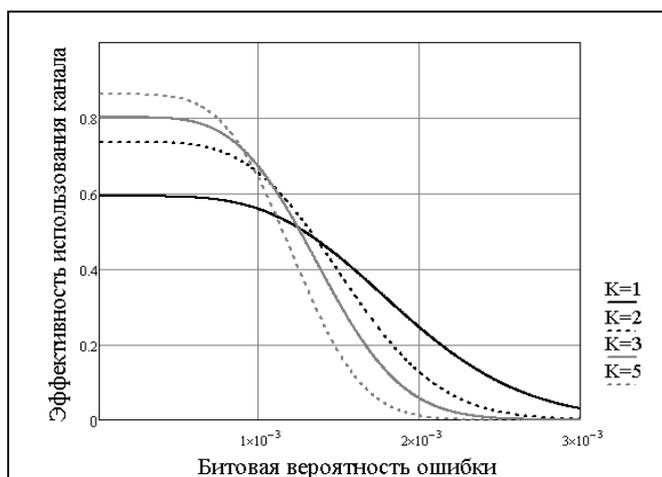


Рис. 3. Зависимость $ChUtil(p_{BIT})$ для MCS2 при различных K

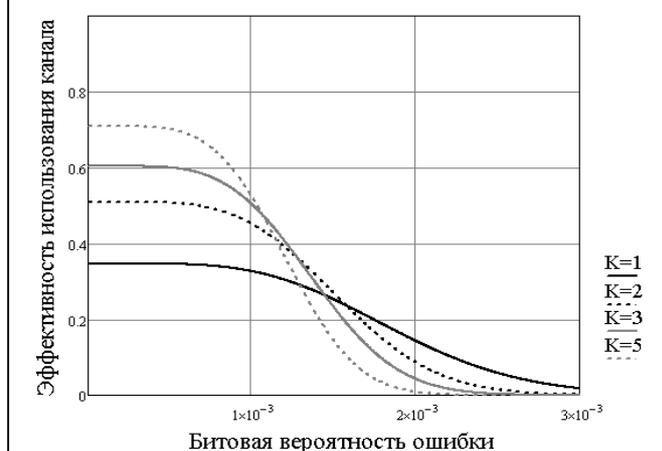


Рис. 4. Зависимость $ChUtil(p_{BIT})$ для MCS6 при различных K.

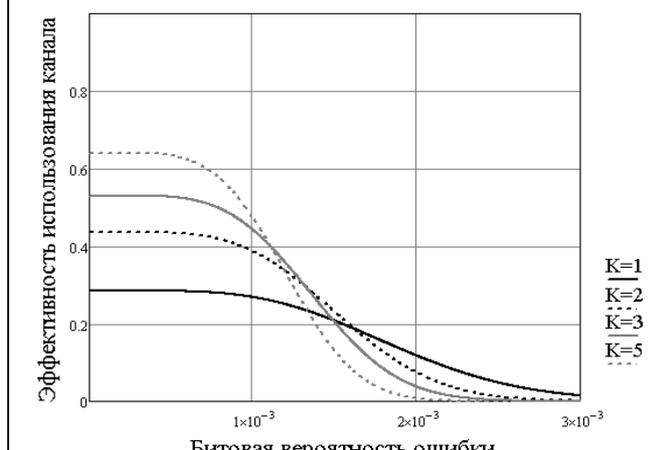


Рис. 5. Зависимость $ChUtil(p_{BIT})$ для MCS8 при различных K

Отметим, что в дополнении 802.11ac, любой A-MSDU передаётся на физический уровень, будучи дополнительно упакован как A-MPDU,

даже если в очереди на уровне PLCP стоит только один A-MSDU. Здесь мы не учитываем заголовки A-MPDU, поскольку для задачи оценки эффективности агрегирования собственно режима A-MSDU это, строго говоря, не важно.

Для оценки практических пределов применимости режима агрегирования A-MSDU определим четыре параметра следующим образом:

- $L_{MSDU} = 700$ Байт (средний размер согласно [14]);

- $K = \{1; 2; 3; 5\}$, при этом $K = 1$ обозначает отсутствие агрегирования;

- $PHYRate$, как и N_{DBPS} в данной задаче мы будем считать как заданные постоянные исходя из типа выбранной MCS. Предположим, что работа идёт в режимах MCS 2, 6 и 8 при коротком защитном межсимвольном интервале ($GI = 0,4$ мкс) стандарта 802.11ac, канал VHT20. Данные индексы MCS выбраны, поскольку они имеют одинаковую скорость кодирования [1], равную $3/4$, что позволит сравнивать результаты в одном масштабе.

В выбранном случае для 802.11ac: $T_{PHY-PREAMBLES} = 40$ мкс, $T_{SIFS} = 16$ мкс, $T_{DIFS} = T_{SIFS} + 2T_{slot}$, $T_{DIFS} = 34$ мкс. Средний back-off интервал T_{BO} определяется, как $T_{BO} = \frac{(CW_{min} - 1) \cdot T_{slot}}{2}$ [15]. Имеем $CW_{min} = 15$ мкс и $T_{slot} = 9$ мкс (для всех типов каналов) [1]. Т.е. в нашем случае $T_{BO} = 63$ мкс.

Построим зависимости $ChUtil(p_{BIT})$ для зашумлённого случая для кадров трафика с различными K и заданными выше характеристиками, и определим значение p_{BIT} , ниже которого использование A-MSDU эффективно. Сделаем это для трёх выбранных MCS (см. рис. 3–5 соответственно).

Обратим внимание, что существует значение p_{BIT} , которое является предельным для режима A-MSDU. Т.е. при больших значениях p_{BIT} эффективность использования канала

снижается относительно неагрегированного ($K = 1$) режима передачи.

Метод выбора оптимального числа кадров в блоке

Аналогично графикам на рис. 3–5 построим зависимости $ChUtil(K)$ для фиксированных $p_{ВИТ}$ для заданных индексов MCS. Они приведены, соответственно, на рис. 6–8.

Из графиков зависимостей видно, что для различных индексов MCS график имеет максимум тем более выраженный, чем выше значение $p_{ВИТ}$. Т.е. наибольшая эффективность достигается при определенном значении K . При этом, наиболее выраженный максимум на графике наблюдается при невысоких номинальных скоростях передачи.

Теперь получим аналитическое выражение для оптимального числа K_{opt} , при котором достигается максимальное значение эффективности использования канала. Это значение соответствует

$$K_{opt} = \arg \max_K (ChUtil(K))$$

при условиях $K \in N, K \leq K_{MAX}$.

При этом K_{MAX} – число кадров в блоке в заданном режиме работы, либо заданное явно, либо соответствующее наибольшему размеру для блока A-MSDU (11454 байт для IEEE 802.11ac).

Для нахождения значения K_{opt} , рассмотрим промежутки монотонности функции $ChUtil(K)$ (21). Из рис. 5–7 видно, что функция $ChUtil(K)$ имеет выраженный экстремум (максимум) на положительной полуоси K , который определяется следующим образом:

$$K_{opt} = \arg \left\{ \frac{d(ChUtil)}{d(K)} = 0 \right\}, \quad (22)$$

при $K > 0$.

Обозначим:

$$T_1 = T_{A-MSDU-Header} + T_{MSDU};$$

$$T_2 = T_{MAC} + SIFS + T_{ACK} + T_{BO} + DIFS + T_{PHY-PREAMBLES}.$$

Тогда производная (21) по K после преобразований:

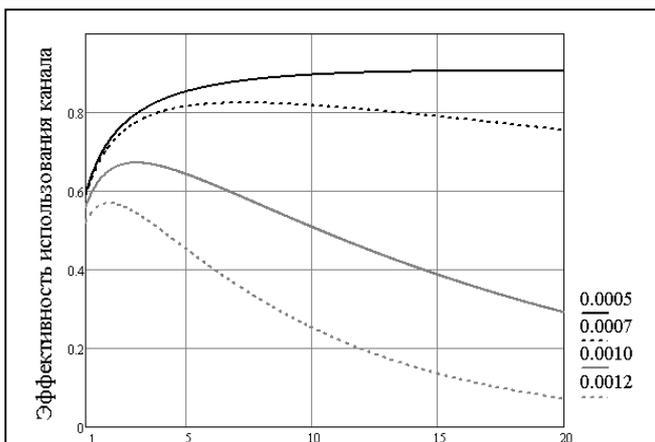


Рис. 6. Зависимость $ChUtil(K)$ для MCS2 при различных $p_{ВИТ}$

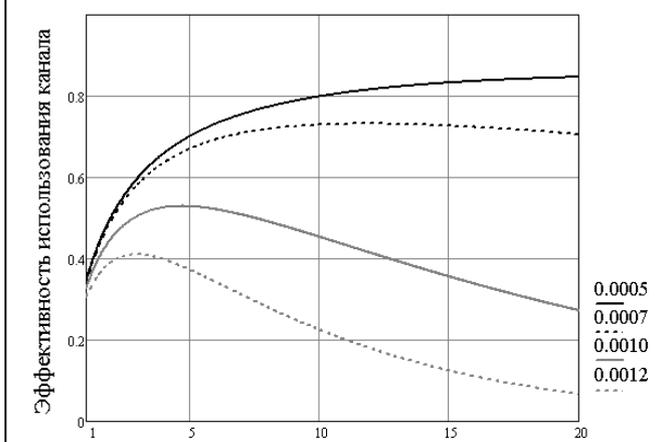


Рис. 7. Зависимость $ChUtil(K)$ для MCS6 при различных $p_{ВИТ}$

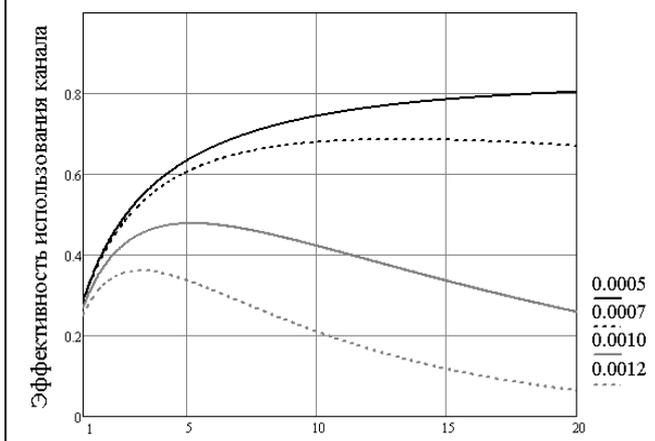


Рис. 8. Зависимость $ChUtil(K)$ для MCS8 при различных $p_{ВИТ}$.

$$\frac{d(ChUtil)}{d(K)} = \left(\frac{K \cdot 8 \cdot L_{MSDU} \cdot p_{CW}^{N_{CW} \cdot K}}{PHYRate \cdot K \cdot T_1 + PHYRate \cdot T_2} \right)' = W(T_2 + N_{CW} \cdot \ln p_{CW} (K^2 \cdot T_1 + K \cdot T_2)), \quad (23)$$

где

$$W = \frac{8 \cdot L_{MSDU} \cdot p_{CW}^{N_{CW} \cdot K}}{PHYRate \cdot (K \cdot T_1 + T_2)^2}.$$

Приравнявая (23) к нулю и решая уравнение, видим, что оно имеет решения только когда

$$T_2 + N_{CW} \cdot \ln p_{CW} (K^2 \cdot T_1 + K \cdot T_2) = 0, \quad (24)$$

а его положительный корень относительно K равен

$$K_{opt} = -\frac{T_2}{2T_1} - \frac{\sqrt{(T_2 N_{CW} \ln p_{CW})^2 - 4T_2 T_1 N_{CW} \ln p_{CW}}}{2T_1 N_{CW} \ln p_{CW}}. \quad (25)$$

Формула (25) даёт аналитическое выражение для оптимального числа кадров при агрегировании А-MSDU в заданных условиях работы. Покажем для примера оптимальное число кадров MSDU, для агрегирования в режиме А-MSDU при следующих условиях: #MCS = 8, $L_{MSDU} = 700$ байт. График приведён на рис. 9.

Так, например, для $p_{BIT} = 0,001$ значение $K_{opt} = 5$, что в точности соответствует максимуму соответствующей кривой на рис. 8. Из

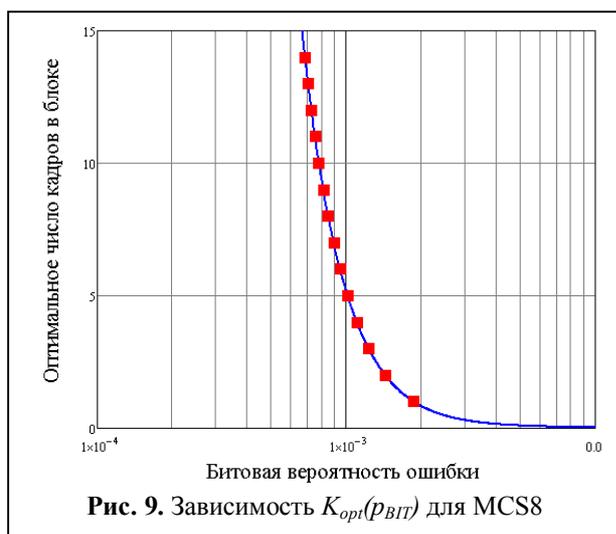


Рис. 9. Зависимость $K_{opt}(p_{BIT})$ для MCS8

графиков видно, что с ростом вероятности битовой ошибки, «коридор», в котором работа данного режима агрегирования полезна, становится всё уже, а абсолютное значение $ChUtil$ – всё меньше.

Таким образом, получены количественные практические оценки режима агрегирования А-MSDU, подтверждающие, что данный режим имеет смысл использовать в канальных условиях, близких к идеальным. Получен метод расчёта оптимального числа кадров в блоке А-MSDU для известного вида трафика в заданных условиях работы канала.

Выводы

1. Проведён анализ стандартов IEEE 802.11 и публикаций в части методов агрегирования кадров с целью повышения эффективности использования каналов, который показал, что существует возможность управления эффективностью стандарта IEEE 802.11ac, для реализации которой необходима разработка соответствующей модели и метода.
2. Доказано, что управление количеством кадров в блоке А-MSDU даёт возможность влиять на эффективность использования канала стандартом IEEE 802.11ac. Без учёта вероятности битовых ошибок повышение количества передаваемых кадров увеличивает эффективность использования канала. Однако в реальных условиях при ненулевой вероятности битовой ошибки возрастают накладные расходы, связанные с повторными передачами кадров, принятых с ошибками, что приводит к задаче поиска оптимального количества кадров.
3. Разработана модель канала стандарта IEEE 802.11ac, позволяющая оценить эффективность его использования на основе данных о вероятности битовой ошибки. Предложенная модель учитывает размер кадров (т.е. тип трафика), вероятность битовой ошибки и механизм кодирования физического уровня для данного дополнения стандарта.
4. Разработан метод выбора оптимального числа кадров в блоке А-MSDU, использование которого позволяет повысить эффективность

использования канала стандарта IEEE 802.11ac.

5. Полученные в работе результаты могут быть использованы для практических расчётов и моделирования процессов, связанных с учётом условий передачи и характеристик трафика на использование канала.

Литература

1. 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. Взамен IEEE Std. 802.11-2012. Введ. 2016. Нью-Йорк: Институт IEEE. 3534 с.
2. *Bhanage G.* AMSDU vs AMPDU: A Brief Tutorial on WiFi Aggregation Support [электронный ресурс] / Arxiv.org: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1704/1704.07015.pdf> (дата обращения 05.05.2018).
3. *Westcott D.A., Coleman D.D., Mackenzie P., Miller B.* CWAP certified wireless professional official study guide (PW-270). Wiley Publishing, 2011. 696 p.
4. *Bianchi G.* IEEE 802.11 – Saturation Throughput Analysis. // IEEE Communications Letters. 1998. Vol. 2. No. 12. Pp. 318–320.
5. *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. Vol. 2017. 11 p. DOI: 10.1155/2017/6747052.
6. *Makolkina M., Vikulov A., Paramonov A.* The augmented reality service provision in D2D network // Communications in Computer and Information Science. 2017. Vol. 700. Pp. 281–290.
7. *Ginzburg B., Kesselman A.* Performance Analysis of A-MPDU and A-MSDU Aggregation in IEEE 802.11n // IEEE Xplore Conference: Sarnoff Symposium 2007. Pp. 1–5. DOI: 10.1109/SARNOF.2007.4567389.
8. *Bourawy A., Alokap T.* Evaluation of Frame Aggregation in Gigabit WLANs // International Journal of Engineering and Applied Sciences (IJEAS). 2017. Vol. 4. No. 4. Pp. 57–59.
9. *Yazid M., Medjkoune-Bouallouche L., Aissani D., Yazid M.* Performance Study of Frame Aggregation Mechanisms in the New Generation WiFi. // Proceedings of the 10th Workshop on Verification and Evaluation of Computer and Communication System (VECoS). Tunis. 2016. Pp. 85–92.
10. *Daldoul Y., Ahmed T., Meddour D-E.* IEEE 802.11n Aggregation Performance Study for the Multicast // IFIP Wireless Days (WD 2011). Canada. 2011. Pp. 1–6. DOI: 10.1109/WD.2011.6098211
11. *Kolap J., Krishnan S., Shaha N.* Frame Aggregation Mechanism for High-Throughput 802.11n Wlans // International Journal of Wireless & Mobile Networks (IJWMN). 2012. Vol. 4. No. 3. Pp. 141–153.
12. *García M.A., Santos M., Villalón J.* IEEE 802.11n MAC Mechanisms for High Throughput: a Performance Evaluation // Proceedings Of The Seventh International Conference on Networking and Services (ICNS). 2011. Pp. 32–37.
13. *Butler B.K.* Minimum distances of the QC-LDPC Codes in IEEE 802 Communication Standards [электронный ресурс] / Arxiv.org. URL: <https://arxiv.org/pdf/1602.02831.pdf> (дата обращения 05.05.2018)
14. *Paramonov A., Vikulov A., Scherbakov S.* Practical Results of WLAN Traffic Analysis // Lecture Notes in Computer Science. 2017. Vol. 10531. Pp. 721–733.
15. *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.

Поступила 9 октября 2018 г.

English

THE EFFICIENCY OF CHANNEL UTILIZATION AND OPTIMIZATION METHOD OF FRAME COUNT IN A-MSDU UNIT FOR IEEE 802.11ac NETWORK

Anton Sergeyevich Vikulov– Post-graduate student, Department of Communication Networks and Data Transmission, The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications.

E-mail: asv012016@gmail.ru.

Alexander Ivanovich Paramonov – Doctor of Engineering, Professor, Department of Communication Networks and Data Transmission, The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications.

E-mail: alex-in-spb@yandex.ru.

Address: 193232, St. Petersburg, Bolshhevikov Ave., 22/1.

Abstract: Frame aggregation in today's Wi-Fi networks, i.e. their transmission by blocks, has become one of the main mechanisms aimed at improving channel resource efficiency. Currently, this is especially important in view of the expected new addition to IEEE 802.11ax standard for improving efficiency. This article gives an overview of the existing methods of frame aggregation and it demonstrates that various frame aggregation methods are suitable for solving the problem from the standpoint of reducing the technological overhead costs from different positions. A-MSDU frame aggregation procedure effect on the efficiency of the network element for IEEE 802.11ac standard is examined and the model of this procedure is proposed, which connects its main parameters with the application conditions. The analytical model is obtained within the framework of this problem for the dependence of the codeword successful reception probability on the bit error probability, which in turn enabled to estimate the successful reception probability of both a single frame and a frame unit. The assessment problem of using the channel resource in view of the aggregation procedure is examined considering the data channel utilization efficiency as a relation between the actual useful data transmission rate to the nominal modulation and coding rate defined via MCS index value. The analytical model is obtained by solving the optimization problem that is finding the conditions under which the maximum efficiency of the channel datalink level is achieved and that makes it possible to assess the optimal frame count in A-MSDU unit for the known bit error probability and the traffic nature. The problem solution has a significant practical value, since the proposed analytical models can be used to assess the network efficiency for the engineering new networks and analysis of the existing WLANs.

Keywords: Wireless access network, IEEE 802.11ac, frame aggregation, A-MSDU, channel utilization efficiency, modulation and coding scheme, frame transmission time.

References

1. 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. Instead IEEE Std. 802.11-2012. Intr. 2016. New-York: IEEE. 3534 p.
2. *Bhanage G.* AMSDU vs AMPDU: A Brief Tutorial on WiFi Aggregation Support [Electronic source]. Arxiv.org: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1704/1704.07015.pdf> (access date 05.05.2018).
3. *Westcott D.A., Coleman D.D., Mackenzie P., Miller B.* CWAP certified wireless professional official study guide (PW-270). Wiley Publishing, 2011. 696 p.
4. *Bianchi G.* IEEE 802.11 – Saturation Throughput Analysis. IEEE Communications Letters. 1998. Vol. 2. No. 12. Pp. 318–320.
5. *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. Vol. 2017. 11 p. DOI: 10.1155/2017/6747052.
6. *Makolkina M., Vikulov A., Paramonov A.* The augmented reality service provision in D2D network. Communications in Computer and Information Science. 2017. Vol. 700. Pp. 281–290.
7. *Ginzburg B., Kesselman A.* Performance Analysis of A-MPDU and A-MSDU Aggregation in IEEE 802.11n. IEEE Xplore Conference: Sarnoff Symposium 2007. Pp. 1–5. DOI: 10.1109/SARNOF.2007.4567389.
8. *Bourawy A., Alokap T.* Evaluation of Frame Aggregation in Gigabit WLANs. International Journal of Engineering and Applied Sciences (IJEAS). 2017. Vol. 4. No. 4. Pp. 57–59.
9. *Yazid M., Medjkoune-Bouallouche L., Aissani D., Yazid M.* Performance Study of Frame Aggregation Mechanisms in the New Generation WiFi. Proceedings of the 10th Workshop on Verification and Evaluation of Computer and Communication System (VECoS). Tunis. 2016. Pp. 85–92.
10. *Daldoul Y., Ahmed T., Meddour D-E.* IEEE 802.11n Aggregation Performance Study for the Multicast. IFIP Wireless Days (WD 2011). Canada. 2011. Pp. 1–6. DOI: 10.1109/WD.2011.6098211
11. *Kolap J., Krishnan S., Shaha N.* Frame Aggregation Mechanism for High-Throughput 802.11n Wlans. International Journal of Wireless & Mobile Networks (IJWMN). 2012. Vol. 4. No. 3. Pp. 141–153.
12. *García M.A., Santos M., Villalón J.* IEEE 802.11n MAC Mechanisms for High Throughput: a Performance Evaluation. Proceedings Of The Seventh International Conference on Networking and Services (ICNS). 2011. Pp. 32–37.
13. *Butler B.K.* Minimum distances of the QC-LDPC Codes in IEEE 802 Communication Standards [Electronic source] / Arxiv.org. URL: <https://arxiv.org/pdf/1602.02831.pdf> (access date 05.05.2018)
14. *Paramonov A., Vikulov A., Scherbakov S.* Practical Results of WLAN Traffic Analysis. Lecture Notes in Computer Science. 2017. Vol. 10531. Pp. 721–733.
15. *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.