

УДК 004.7.052:004.414.2

Амирханов Э.Д., асп. (Национальный авиационный университет)

## АСИМПТОТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СУММАРНЫХ ПОТОКОВ В БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЯХ

**Амирханов Э.Д.** Асимптотичні характеристики сумарних потоків в безпроводових мережах. Розглянуті задачі організації обміну даними в локальній безпроводовій мережі сімейства протоколів IEEE 802.11x. Виведені вирази для імовірності успішної і колізійної передачі даних за наявності і відсутності механізмів RTS/CTS. На основі результатів моделювання показано, що вибір механізму RTS/CTS або альтернативного механізму фрагментації /дефрагментації повинен робитися на основі системного підходу з урахуванням різних характеристик мережі і параметрів трафіку, що передається.

**Ключові слова:** ЛОКАЛЬНА БЕЗПРОВОДОВА МЕРЕЖА, ПРОТОКОЛ IEEE 802.11, МЕХАНІЗМ RTS/CTS, ФРАГМЕНТАЦІЯ, ДЕФРАГМЕНТАЦІЯ

**Амирханов Э.Д.** Асимптотические характеристики суммарных потоков в беспроводных сетях. Рассмотрены задачи организации обмена данными в локальной беспроводной сети семейства протоколов IEEE 802.11x. Выведены выражения для вероятностей успешной и коллизионной передачи данных при наличии и отсутствии механизмов RTS/CTS. На основе результатов моделирования показано, что выбор механизма RTS/CTS или альтернативного механизма фрагментации/дефрагментации должен делаться на основе системного подхода с учетом различных характеристик сети и параметров передаваемого трафика.

**Ключевые слова:** ЛОКАЛЬНАЯ БЕЗПРОВОДНАЯ СЕТЬ, ПРОТОКОЛ IEEE 802.11, МЕХАНИЗМ RTS/CTS, ФРАГМЕНТАЦИЯ, ДЕФРАГМЕНТАЦИЯ.

**Amirkhanov E.D.** Asymptotic characteristics of the total streams in wireless networks. The problems of organization of exchange by information in the local wireless network of family of the IEEE 802.11x protocols are considered. Expressions are shown out for probabilities of successful and collision data communication at presence of and absence of the RTS/CTS mechanisms. On the basis of results the designs are shown, that the choice of the RTS/CTS mechanism or alternative mechanism of fragmentation/defragmentation must be done on the basis of systems approach taking into account different descriptions of network and parameters of the transferred traffic.

**Keywords:** LOCAL WIRELESS NETWORK, IEEE 802.11 PROTOCOL, RTS/CTS MECHANISM, FRAGMENTATION, DEFRAGMENTATION

**Введение.** В локальных беспроводных сетях протоколов IEEE 802.11x применяется архитектура Ad Hoc или структурирование с точками доступа (Access Points). В любом случае сеть имеет полнодоступную топологию. Множественный доступ осуществляется детерминированным способом с введением элемента случайности во время ожидания станции. Поэтому задача оценки пропускной способности сети, вероятностей успешной передачи и задержек передачи является всегда актуальной.

Ключевые показатели производительности сети:

- среднее значение задержки пакета;
- вероятность отказа в передаче пакета.

По этим показателям можно получить объективные сравнительные оценки методов организации множественного доступа с применением различных механизмов предотвращения коллизий. Решению данных задач и посвящена настоящая работа.

**Постановка задачи.** Множественный доступ к среде передачи по протоколу IEEE 802.11 [1] осуществляется с помощью механизма распределенного управления, в котором реализован метод контроля несущей и предотвращения коллизий CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance). Прежде чем начать передачу, каждая станция сети прослушивает канал передачи. Убедившись, что канал свободен, станция выжидает в течение случайно выбираемого интервала отсрочки, который формируется из слотов постоянной длительности  $\tau_{wait}$ . Отсчет слотов отсрочки ведется только при свободном канале. Если счетчики двух и более станций одновременно достигли нулевого значения, может произойти коллизия, длительность которой определяется кадром максимальной длины из числа вовлеченных в коллизию. Перед переходом в состояние отсрочки после передачи очередного кадра данных станция инициализирует счетчик слотов отсрочки некоторым начальным значением, равновероятно выбираемым из интервала целых чисел  $[0, 1, \dots, \Delta\tau_{cw}]$ , где величина  $\Delta\tau_{cw}$  – размер окна конкуренции (Contention Window). Если

предыдущая передача прошла успешно, то  $\Delta\tau_{cw}$  имеет минимально возможное значение  $\Delta\tau_{cw\min}$ . В противном случае оно определяется числом  $n_{at}$  неудачных попыток передачи. Максимальный размер окна  $\Delta\tau_{cw\max}$  равен

$$\Delta\tau_{cw\max} = (\Delta\tau_{cw\min} + 1)2^{n_{at}-1}.$$

Кроме того, в схеме доступа к каналу передачи предусмотрены приоритеты для трафика с разной чувствительностью к задержкам (эластичностью). В схеме доступа с приоритетами вводятся следующие значения межкадрового интервала IFS (Interframe Space – IFS) [1].

1. SIFS (Short IFS – короткий IFS). Минимальный IFS, используемый для всех немедленных ответных действий.

2. PIFS (Point Coordination Function IFS – IFS точечной координационной функции). Это интервал среднего размера, используемый централизованным средством управления в схеме PCF при организации опроса.

3. DIFS (Distributed Coordination Function IFS – IFS распределенной координационной функции). Наибольший интервал IFS, используемый в качестве минимальной задержки для кадров, состоящих за доступ в асинхронном режиме передачи.

4. EIFS (Extended IFS). Расширенный IFS, применяемый при повторной передаче, если предыдущая попытка передачи была неудачной.

Если переданный кадр данных успешно принят станцией назначения, она по истечении интервала SIFS отправляет подтверждение успешной передачи – кадр ACK (Acknowledgement). После завершения попытки передачи очередного кадра данных станция переходит в состояние отсрочки через интервал DIFS, если попытка была успешной, или EIFS – при неудачной попытке.

Для защиты передачи длинных кадров данных от коллизий, в протоколе IEEE 802.11 может использоваться так называемый механизм RTS/CTS, при котором передача данных предваряется обменом короткими кадрами RTS и CTS.

Кроме того, применяются такие механизмы повышения эффективности передачи данных, как фрагментация пакетов, переключение скорости передачи, блочные передача и подтверждение, установление прямых соединений, а также механизмы, направленные на обеспечение качества обслуживания (QoS – Quality of Service).

**Оценка ключевых показателей сети.** Рассмотрим процесс передачи кадра при наличии механизма переключения скорости, который представляет собой марковский процесс гибели и размножения [2] с дискретным временем, элементарным интервалом которого является время выполнения попытки передачи кадра.

Процесс гибели и размножения может иметь  $N_i$  состояний, в каждом из которых состояние  $n_i$  с вероятностью  $p_i$  соответствует передаче станции на  $V_i$ -ой битовой скорости;  $p_{ij}$  – вероятность размножения, т.е. увеличения битовой скорости, а  $q_{ij} = 1 - p_{ij}$  – вероятность гибели, т.е. уменьшения битовой скорости.

На рис. 1 представлена схема переходов из одного состояния в другое.

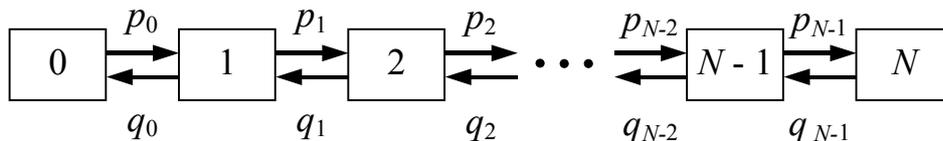


Рис. 1. Граф-схема переходов состояний

Обобщим процесс на случай разных возможных значений  $n_{j+}$  успешных передач и разных возможных значений  $n_{j-}$  неуспешных передач. Из любого состояния  $s_{ij}$ ,  $j = 0, 1, 2, \dots, N$ , означающего, что на скорости  $V_i$  последовательно произошло  $n_{j+}$

успешных или  $n_{j-}$  неуспешных передач, возможно два (и только два) альтернативных перехода, соответствующих успеху с вероятностью  $p_{ij}$  или неудаче с вероятностью  $q_{ij} = 1 - p_{ij}$  очередной попытки передачи. Стационарные вероятности состояний  $\tilde{p}_{ij}$  для предложенной модели равны:

$$\tilde{p}_{1j} = 1 / \left( 1 + \sum_{n=2}^N \prod_{i=1}^n \frac{p_{1,j-1}}{q_{1i}} \right), \quad p_{ij} = \prod_{j=2}^n \frac{p_{i,j-1}}{q_{ij}}, \quad n = 2, \dots, N. \quad (1)$$

С учетом вышеизложенного наибольшая вероятность перехода в состояние размножения

$$p_0 = (1 - e^{-N\lambda t_e})(1 - e^{-N\lambda t_s}),$$

где  $\lambda$  – средняя интенсивность поступления кадров на интервале передачи;  $t_s$  – средняя продолжительность интервала передачи;  $t_e$  – средняя продолжительность свободного интервала, на котором ни один узел не осуществляет передачу.

Обозначим сумму длин очередей в начале интервала через  $R_\Sigma$ . При  $R_\Sigma > 0$  вероятность того, что сумма длин очередей будет равна  $R_\Sigma$ , вычисляется по формуле [3]:

$$p_{R_\Sigma} = \sum_{n=n_{\min}(R_\Sigma)}^{\min(N, R_\Sigma)} \gamma(n, R_\Sigma) \left\{ [1 - \beta_q^e(n, R_\Sigma)] p_C(n) (1 - e^{-n\lambda t_e}) + [1 - \beta_q^f(n, R_\Sigma)] [p_\alpha(n) (1 - e^{-N\lambda t_s}) + p_C(n) [1 - \beta(n)] (1 - e^{-N\lambda t_c})] \right\}. \quad (2)$$

Здесь  $n_{\min}(n, R_\Sigma) = \{ [(R_\Sigma - 1) / B] + 1 \}$ , где  $\lfloor x \rfloor$  – целая часть числа  $x$ ;  $\gamma(n, R_\Sigma)$  – вероятность наличия  $n$  активных станций при условии, что  $\beta_q^e(n, R_\Sigma)$  и  $\beta_q^f(n, R_\Sigma)$  – вероятность потери из-за переполнения буфера, в который поступает новый пакет, при данных  $n$  и  $R_\Sigma$ .

Вероятность ( $\beta_q^e$ ) для свободного интервала отличается от вероятностей для остальных интервалов, поскольку по определению в течение свободного интервала пакеты могут поступать только в буферы активных станций. Кроме того, очевидно, что эта вероятность равна 0 при  $R_\Sigma < n + B - 1$ ;  $\beta(n)$  – вероятность отказа из-за достижения предельного числа  $N_r$  повторных передач при данном числе активных станций. Предполагается, что счетчик  $n_r$  может достичь предельного числа  $N_r$  только в одной из станций, участвующих в коллизии.

**Теперь рассмотрим среднее время задержки кадра.** Без потери общности результатов можно ввести вполне логичное допущение, что для любой станции вероятность  $p_{bs}$  начала передачи в течение произвольно выбранного виртуального слота не зависит от предыстории или от текущих состояний других станций и одинакова для всех станций сети. Отдельно рассмотрим случай длинных кадров и применения механизма RTS/CTS и случай коротких кадров, соответственно, без применения RTS/CTS.

В первом случае длительность  $T_{c,RTS}$  периода коллизии равна сумме длительности отсрочки  $t_{bo}$ , длительности сигнала запроса  $t_{RTS}$  и длительности расширенного межкадрового интервала  $t_{EIFS}$ :

$$T_{c,RTS} = t_{bo} + t_{RTS} + t_{EIFS}. \quad (3)$$

Длительность интервала  $T_{s,RTS}$  успешной передачи представляет собой сумму следующих слагаемых:

$$T_{s,RTS} = t_{bo} + t_{RTS} + t_{SIFS} + t_{CTS} + t_{SIFS} + t_{DATA} + t_{SIFS} + t_{ACK} + t_{DIFS}, \quad (4)$$

где  $t_{DATA}$  – длительность кадра данных.

Соответственно, во втором случае длительность  $T_{c0}$  периода коллизии

$$T_{c0} = t_{bo} + t_{DATA} + t_{EIFS}, \quad (5)$$

а длительность  $T_{s0}$  успешной передачи

$$T_{s0} = t_{bo} + t_{DATA} + t_{SIFS} + t_{ACK} + t_{DIFS}. \quad (6)$$

Поскольку механизм *RTS/CTS* является необязательной опцией протокола IEEE 802.11 и применяется только при необходимости, более подробно рассмотрим случай коротких кадров. Выразим соотношения (5), (6) через битовые размеры составляющих кадра данных, служебных кадров и битовую скорость. Длительность периода коллизии

$$T_{S0} = t_H + t_D + t_{ACK} + \sum_i t_{di} = \frac{L_H + L_{DATA} + L_{ACK}}{V_r} + \sum_i t_{di}, \quad (7)$$

где  $L_H, L_{DATA}$  – длина заголовка и поля данных пакета соответственно;  $L_{ACK}$  – длина кадра подтверждения (ACKnowledgement);  $t_{di}$  – защитные интервалы после передачи кадра подтверждения и успешной передачи собственно кадра данных.

Время коллизии, в которое входит защитный интервал  $t_u$  после последней неудачной попытки передачи и, как результат – потери данных, определяется как  $t_c = (L_D/V) + t_u$ .

Длительность “успешного” слота равна  $t_c = \frac{l}{V} + t_H + t_{EIFS}$ .

Среднее время неколлизионной передачи кадра длиной  $L_\Sigma = L_H + L_{DATA}$  равняется  $\tilde{t}_s = (1 - q_{ij})t_s + q_{ij}t_c$ , где  $t_s = \frac{L_\Sigma}{V_{av}} + t_H + t_{ACK} + t_{SIFS} + t_{DIFS}$ , а время неудачной передачи из-за коллизии равно  $t_c$ .  $V_{av}$  – средняя скорость передачи данных в течение сеанса связи.

**Результаты моделирования.** Для оценивания сравнительных характеристик сетей с разным количеством станций были выбраны следующие параметры (см. табл. 1).

Параметры беспроводной сети

Табл. 1

Параметр	Значение
Битовая скорость $V_{av}$	10 Мбит/с
Длительность виртуального слота	2 мкс
Физический размер преамбулы $L_f$	72 бит
Физический размер заголовка $L_H$	24 бит
$t_{SIFS}$	1 мкс
$t_{DIFS}$	5 мкс
$t_{EIFS}$	$\left[ \frac{(L_{SIFS} + L_f + L_H + L_{ACK})}{V_{av}} \right] + t_{DIFS}$
Размер данных на уровне доступа к среде	128 бит
Размер кадра подтверждения $L_{ACK}$	64 бит
Размер кадра <i>RTS</i>	48 бит
Размер кадра <i>CTS</i>	64 бит

По выражениям (1), (2) вычислялись вероятности успешной и коллизионной передачи. Соответственно, с использованием исходных данных, приведенных в табл.1, по выражениям (5), (7) были рассчитаны длительности успешного и коллизионного слотов.

Общее выражение для средней пропускной способности сети имеет вид [3]:

$$C_{aver} = \frac{p_S \tilde{L}_{DATA}}{p_E L_E + p_S L_S + p_C L_C}, \quad (8)$$

где  $L_E, L_S, L_C$  – средние длительности свободного, успешного и коллизийного слотов соответственно;  $p_E, p_S, p_C$  – вероятности событий свободного, успешного и коллизийного слотов;  $\tilde{L}_{DATA}$  – среднее число бит информации, переданных в течение успешного слота.

По формуле (8) рассчитана нормированная пропускная способность сети в зависимости от числа станций, участвующих в передаче, для разных значений длительности кадра данных (рис. 2).

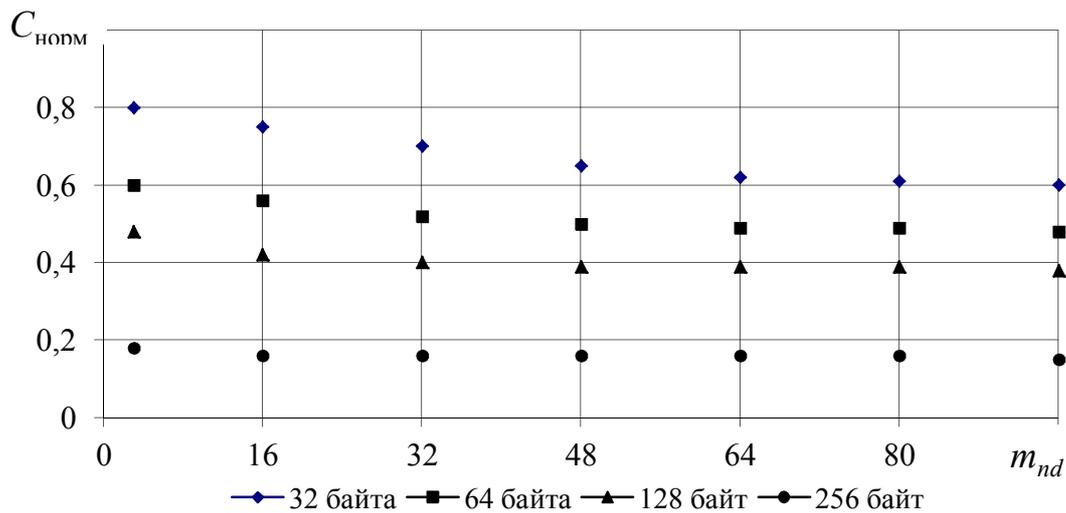


Рис. 2. Зависимость нормированной пропускной способности беспроводной сети от числа работающих станций при разных размерах кадров данных

По результатам моделирования можно сделать вывод, что основное влияние на пропускную способность сети оказывает размер кадра данных. Поэтому для достижения максимально возможной пропускной способности при передаче кадров большой длительности целесообразно применять механизм RTS/CTS. При этом, конечно, увеличивается общий размер виртуального слота, в течение которого производится передача.

Альтернативный путь решения проблемы – фрагментация кадров большой длительности и передача коротких фрагментов без применения механизма RTS/CTS. Однако необходимо тщательно рассчитывать общее время обработки с учетом механизма фрагментации-дефрагментации. По существу, необходимо применять системный подход к выбору метода передачи и обработки данных.

**Заключение.** В данной работе проанализированы вероятностные и временные характеристики процесса обмена данными в беспроводной сети, работающей по протоколу IEEE 802.11. Для выбора оптимального метода передачи по критерию максимально достижимой пропускной способности сети необходимо решать задачу параметрической векторной оптимизации, т.е. задачу системного анализа сети. Эту задачу планируется рассмотреть в будущем.

### Литература

1. IEEE 802.11™ Wireless Local Area Networks. The Working Group for WLAN Standards [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.ieee802.org/11/>
2. Прохоров Ю.В. Теория вероятностей. Основные понятия. Предельные теоремы. Случайные процессы / Ю.В. Прохоров, Ю.А. Розанов. – М.: Наука, 1967. – 496 с.
3. Широкополосные беспроводные сети передачи информации [В.М. Вишневецкий, А.И. Ляхов, С.Л. Портной, И.В. Шахнович]. – М.: Техносфера. – 2005. – 592 с.