

Эффективность блочной передачи трафика, чувствительного к задержкам, при МССА-доступе в сетях IEEE 802.11s

Андрей Гущин
ИППИ РАН
guschin@frtk.ru

Михаил Якимов
ИППИ РАН
yakimov@iitp.ru

Аннотация

Блочная передача трафика является механизмом увеличения производительности сети за счет снижения накладных расходов канального уровня, связанных с квити́рованием кадров данных. Однако использование этого механизма совместно с детерминированным доступом к среде связано с некоторыми сложностями, одной из которых является необходимость соблюдения QoS-требований предъявляемых к передаваемым данным. В работе рассматривается применение механизма блочной передачи для одношаговой и многошаговой передачи периодического трафика, чувствительного к задержкам, в сетях IEEE 802.11s с использованием детерминированного доступа МССА. В работе предлагается алгоритм, позволяющий с помощью имитационного моделирования определить оптимальные параметры устанавливаемого резервирования для передающей станции, а также исследуется целесообразность использования блочной передачи и определяется область ее эффективности.

1. Введение

В настоящее время наблюдается стремительное развитие беспроводных сетей передачи данных. Одной из передовых технологий в этой области являются беспроводные многошаговые сети или mesh-сети, основанные на стандарте IEEE 802.11s [1]. Такие сети характеризуются отказоустойчивостью, масштабируемостью и возможностью быстро адаптироваться к изменению своей топологии. Кроме конкурентного (EDCA) доступа к среде в mesh-сетях IEEE 802.11s используется также детерминированный доступ с резервированием канала передачи - МССА. При таком способе доступа станция, желающая передавать данные, резервирует периодические интервалы времени, в течение которых только эта станция может передавать пакеты. Другие станции при этом должны воздерживаться от передачи данных.

Таким образом МССА представляет собой бесконкурентный доступ к среде, который позволяет эффективно избегать коллизий и повышать вероятность успешной доставки пакета. Метод доступа МССА в силу того, что канал резервируется периодически, позволяет вести бесколлизийную передачу не только отдельных пакетов, но и потоков данных, в том числе чувствительных к задержкам (голосовые, аудио и видео потоки). Однако стоит отметить, что при МССА-доступе невозможно мгновенно устанавливать, изменять или отменять резервирование, так как эти процедуры требуют существенных накладных расходов. Данная работа посвящена исследованию передачи потоков данных в одношаговых и многошаговых mesh-сетях IEEE 802.11s с МССА-доступом.

2. Блочная передача в протоколе IEEE 802.11s

2.1. Общее описание

В сетях IEEE 802.11 базовым способом передачи данных является поадресная передача. Однако стандарт IEEE 802.11 [2] также допускает использование механизма блочной передачи данных, при которой несколько кадров агрегируются в блок, как показано на рисунке 1. При получении доступа к каналу все кадры блока передаются друг за другом с минимально возможным межкадровым интервалом SIFS или RIFS (в IEEE 802.11n). После последнего кадра станция передает получателю данных запрос BAR на квитирование блока. Получив блок и запрос BAR, станция-приемник через короткий межкадровый интервал SIFS отправляет единственный кадр B-ACK (Block-ACK) с квитанциями о получении кадров в составе принятого блока. Положительно квитированные кадры считаются доставленными успешно и более не передаются. Те кадры, которые были квитированы отрицательно, будут повторно переданы в составе следующего блока. При блочной передаче

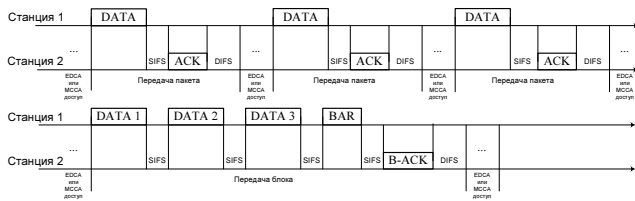


Рис. 1. Схема по пакетной (вверху) и блочной (внизу) передачи трёх пакетов данных.

число кадров подтверждения уменьшается, что снижает накладные расходы канального уровня и позволяет использовать данный механизм для повышения производительности беспроводных сетей на базе протокола IEEE 802.11.

Исследованию механизма блочной передачи данных в сетях с протоколом IEEE 802.11 посвящено немалое количество работ различных авторов. Однако практически все эти работы ограничиваются оценкой производительности сетей IEEE 802.11 при использовании блочной передачи для насыщенного трафика в условиях конкурентного доступа EDCA. Наиболее известными из таких работ являются [3] – [5]. Помимо отсутствия анализа эффективности блочной передачи в условиях бесконкурентного доступа с резервированием канала в них также не уделяется внимание проблемам, возникающим при передаче трафика, чувствительного к задержкам.

2.2. Использование блочной передачи при МССА-доступе

Опишем особенности использования блочной передачи совместно с МССА. Если передаваемый трафик не является чувствительным к задержкам (как правило, это насыщенный трафик), то длительность интервала резервирования однозначно определяет размер блока пакетов, а именно, используется блок с максимальным размером при заданной длительности его передачи с учетом последующего квитиования. В свою очередь, размер блока и период резервирования определяют скорость передачи данных, поэтому с точки зрения уменьшения накладных расходов, целесообразно выбирать размер блока, а, следовательно, и интервал резервирования максимально возможным.

В случае передачи трафика, чувствительного к задержкам, интервалом резервирования должен быть согласован с размером блока, а тот, в свою очередь, с интенсивностью поступающего трафика. Если интервал окажется слишком большим, то за период резервирования в очередь для передачи поступит пакетов меньше, чем максимальный размер блока, и длительность отправленного блока будет меньше длительности зарезервированного интерва-

ла. Канальный ресурс будет потрачен впустую, поскольку в оставшейся части интервала резервирования ни одна станция не будет передавать данные. Таким образом, размер блока и период резервирования определяют расписание, которое устанавливает станция перед передачей данных, а эффективность блочной передачи напрямую зависит как от выбранного расписания, так и от передаваемого потока (его интенсивности, распределения времени между поступлениями пакетов, допустимой задержки при передаче и т.д.)

3. Постановка задачи

Рассмотрим пару станций А и В, работающих по протоколу IEEE 802.11s в режиме МССА и связанных друг с другом стационарным беспроводным каналом связи. Пусть между станциями передается поток трафика с постоянным периодом Δt_{flow} поступления пакетов, которые имеют одинаковый размер. Помехи в канале, возникающие при передаче пакетов, будем считать случайными, а вероятность успешной передачи пакета постоянной. Обозначим ее через p . К потоку предъявляются следующие QoS-требования: τ^* - максимальная задержка пакета при передаче через канал (в качестве единицы измерения используется период входного потока Δt_{flow}) и γ^* - доля пакетов, потерянных в силу превышения задержки. Станция А использует механизм блочной передачи, описанный в разделе 2.1, и перед началом передачи потока проводит резервирование, устанавливая размер блока B и период резервирования α , которые не меняются в процессе передачи пакетов потока. Передача каждого пакета повторяется до тех пор, пока он не будет успешно передан или его время пребывания на станции А не превысит максимальное время задержки τ^* . В последнем случае пакет отбрасывается.

Будем говорить, что описанная выше система передачи данных стабильна, если выполняется соотношение $\frac{Bp}{\alpha} > 1$, и нестабильна в противном случае. Данное соотношение следует из требования чтобы интенсивность обслуживания пакетов была строго больше интенсивности их поступления в систему.

Введем также понятие избыточности блочной передачи, характеризующей долю накладных расходов, возникающих при блочной передаче трафика. Доля канального ресурса (времени), затрачиваемая на блочную передачу трафика равна $\frac{Bt_{frame} + t_{serv}}{\alpha \Delta t_{flow}}$, где Δt_{flow} - периодичность потока трафика, поступающего на первую станцию, t_{frame} - время, затрачиваемое на передачу одного пакета, а t_{serv} - время, необходимое для выполнения процесса квитиования и прочих служебных операций. С другой стороны, минимальная доля канального ресурса (времени), необходимая для отправки поступающих пакетов потока

равна $\frac{t_{frame}}{\Delta t_{flow}}$. Отсюда избыточность равна $V = \frac{B+O}{\alpha} - 1$, где $O = \frac{t_{serv}}{t_{frame}}$ является характеристикой канального уровня.

В рамках приведенной схемы передачи интересует решение следующих задач:

1. Построение метода экспериментального нахождения оптимальной (в смысле минимизации функции избыточности) схемы резервирования для передачи потока трафика с учетом QoS-требований.
2. Определение области эффективности блочной передачи на множестве значений QoS-требований и вероятности успешной передачи пакета через канал.

Перед формулировкой следующей задачи рассмотрим ситуацию, в которой станции А и В удалены друг от друга и связаны только через промежуточные станции, также работающие по протоколу IEEE 802.11s (МССА). Пусть протоколом маршрутизации верхнего уровня (например, стандартным для IEEE 802.11s протоколом HWMP) проложен маршрут от станции А до станции В. В таком случае будем говорить о цепочке последовательно связанных друг с другом беспроводных станций. Поскольку QoS-требования τ^* и γ^* определяют допустимую задержку и долю потерь на станции-приемнике, то необходимо выбрать способ распределения требований для промежуточных станций цепочки. Пусть QoS-требования делятся равномерно между станциями, тогда соответствующие QoS-требования для i -ой станции цепочки длины N находятся по формулам:

$$\tau_i^* = \frac{\tau^*}{N}, \quad \gamma_i^* = 1 - \sqrt[N]{1 - \gamma^*}, \quad i = \overline{1, N}.$$

Понятие избыточности блочной передачи для такой цепочки станций легко обобщается и ее значение равно сумме соответствующих значений для каждой станции. Таким образом для многошаговой передачи потокового трафика встает следующая задача:

3. Определение целесообразности использования блочной передачи при передаче по многошаговому маршруту потоков данных, чувствительных к задержкам.

4. Описание имитационной модели

4.1. Постановка экспериментов

Для решения задач, поставленных в предыдущем разделе, была разработана имитационная модель в среде GPSS World [6], реализующая метод

доступа МССА и блочную передачу по одношаговым и многошаговым маршрутам, с учетом указанных выше QoS-требований к передаваемым данным. Данная модель позволяет для установленных параметров потока, канала и резервирования получать оценку доли потерянных пакетов, а также проводить различного рода оптимизирующие эксперименты.

4.2. Оптимальная схема резервирования

На базе построенной имитационной модели реализован алгоритм нахождения оптимальной схемы резервирования в смысле минимизации избыточности V . Данный алгоритм достаточно прост. Положим размер блока B параметром и для каждого его значения найдем оптимальное значение периода резервирования α , после чего выберем значение B , которому соответствует наименьшее значение избыточности. Значения B выбираются из отрезка $[1, \tau^*]$. Поясним этот момент. Поскольку трафик строго периодичный, то в очереди на отправку всегда находится не более, чем τ^* пакетов, так как остальные пакеты отброшены в силу превышения задержки. Таким образом, даже при максимальном размере блока больше, чем τ^* , в блок попадает не более τ^* пакетов и интервал резервирования оказывается не заполненным до конца, что приводит к неэффективному использованию канального ресурса.

Из формулы для избыточности видно, что функция V монотонно убывает с ростом α при любом фиксированном размере блока B . С другой стороны, доля потерянных при передаче пакетов монотонно растет с увеличением периода резервирования α , поэтому для минимизации избыточности нужно взять наибольшее значение периода резервирования при котором QoS-требование на долю потерянных пакетов еще выполняется. В модели поиск такого оптимального значения α происходит в два этапа:

1. Локализация искомого значения. В качестве первого приближения возьмем значение $\tilde{\alpha}_0 = B \cdot p$, где p - вероятность успешной передачи пакета. Если при таком α доля потерянных при передаче пакетов превысит требование к качеству обслуживания, то отрезком локализации будет являться отрезок $[0, \tilde{\alpha}_0]$. Если при данном значении периода резервирования QoS-требование еще выполняется, то значение удваивается до тех пока доля потерянных пакетов не превысит требование: $\alpha_n = 2^n B \cdot p = 2^n \tilde{\alpha}_0$. В таком случае отрезком локализации будет являться $[\alpha_{n-1}, \alpha_n]$, где n - число удвоений приближенного значения периода резервирования. Отметим, что при периоде резервирования равном начальному значению отрезка локализации QoS-требования к доле потерянных пакетов выполняются, в то время как при величине α равной конечному

значению отрезка локализации это требование не выполняется.

- Поиск оптимального значения периода резервирования. Зная отрезок $[\alpha_0, \alpha_1]$ на котором локализовано оптимальное значение периода резервирования, найдем его (с заданной точностью) методом деления пополам. В качестве очередного приближения возьмем значение $\tilde{\alpha} = \alpha_0 + \frac{\alpha_1 - \alpha_0}{2}$. Если при этом значении доля потерянных пакетов не превышает QoS-требование, то новым отрезком локализации становится $[\tilde{\alpha}, \alpha_1]$ в противном случае - $[\alpha_0, \tilde{\alpha}]$. За конечное число шагов будет найдено такое $\tilde{\alpha}$, что процент потерянных пакетов с заданной точностью будет равен γ^* .

4.3. Эффективность блочной передачи

Для определения области эффективности блочной передачи проведем поиск оптимальной схемы резервирования для каждой тройки параметров (γ^*, τ^*, p) на некоторой сетке значений $(\gamma_k^*, \tau_l^*, p_m)$. После этого выберем те тройки параметров, при которых оптимальный размер блока, определяемый с помощью алгоритма описанного в разделе 4.2, больше единицы. Множество этих троек будет являться областью, в которой блочная передача эффективнее по пакетной передаче.

4.4. Блочная передача по многошаговым маршрутам

Поиск оптимальной схемы резервирования для каждой пары станций в цепочке будем вести следующим образом. Описанным в разделе 4.2 методом найдем оптимальную схему резервирования для первой станции в цепочке. После чего зафиксируем ее и найдем таким же образом оптимальную схему резервирования для следующей станции в цепочке. Так, фиксируя значения параметров расписания для предыдущих станций, найдем оптимальное расписание для всех последующих.

5. Численные результаты

В качестве передаваемого трафика возьмем поток видеоданных постоянной битовой скорости с межкадровым периодом $\Delta t_{flow} = 40$ мс. Данный период будет служить единицей модельного времени во всех экспериментах, проводимых далее. Зафиксируем в первом эксперименте вероятность успешной попытки передачи пакета на уровне $p = 0.9$. На рисунке 2 представлено семейство кривых отражающих зависимость доли потерянных пакетов при передаче периодического потока от станции А к станции В от значения периода резервирования. Каждая

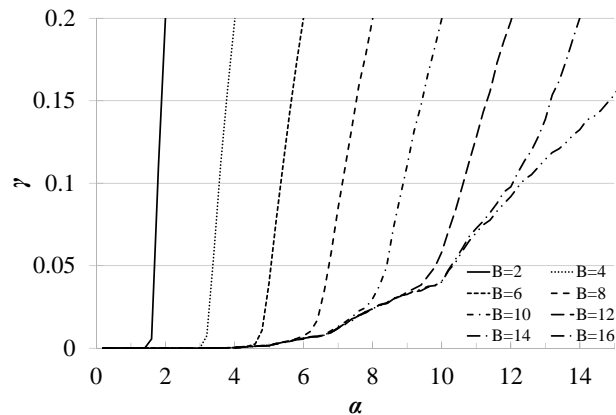


Рис. 2. Зависимость доли потерянных пакетов от периода резервирования при различных размерах блока.

кривая соответствует различным значениям размера блока B . Видно, что при заданном уровне допустимой доли потерянных пакетов γ^* возможны несколько схем резервирования. Из них выбирается оптимальная с точки зрения минимизации избыточности.

Для определения области эффективности блочной передачи выберем следующую сетку для троек параметров (γ^*, τ^*, p)

$$\gamma^* = 0.01, 0.02, 0.04;$$

$$\tau^* = 2, 4, \dots, 16;$$

$$p = 0.5, 0.55, \dots, 1.$$

На рисунках 3 – 5 показаны области (сплошные маркеры), в которых оптимальное значение размера блока больше единицы, для допустимой доли потерянных пакетов $\gamma^* = 0.04$, $\gamma^* = 0.02$ и $\gamma^* = 0.01$ соответственно. Можно заметить, что при уменьшении доли γ^* область, в которой передача стабильна увеличивается, в то время как области нестабильной передачи уменьшаются. Видно, что в случае достаточно строгих QoS-требований ($\tau^* < 8$, что при $\Delta t_{flow} = 40$ мс составляет менее 320 мс; такая задержка характерна, например, для голосового трафика) по пакетной передаче по-прежнему более эффективна. При менее строгих требованиях к задержке ($\tau^* \geq 10$ или $\tau^* \geq 400$ мс, что характерно для видео трафика) эффективнее блочная передача.

Для многошаговой передачи был проведен ряд экспериментов в результате которых выявилась следующая закономерность. Если на первой станции цепочки расписание установлено так, что система передачи данных является стабильной (см. раздел 3), то она останется стабильной и для всех остальных станций в цепочке вне зависимости от ее длины. Также наблюдалось, что значения параметров оптимального резервирования в таком случае будут близкими

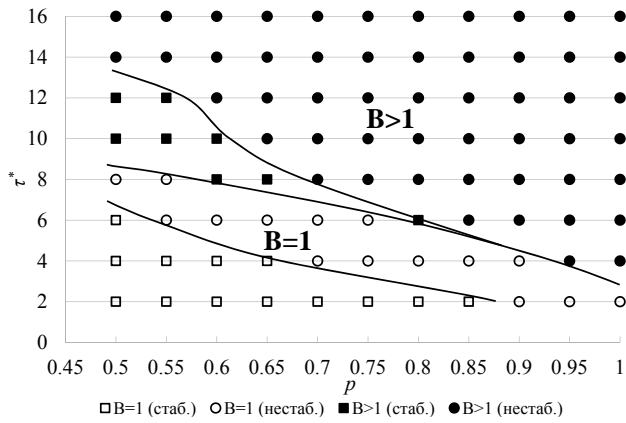


Рис. 3. Область эффективности блочной передачи при $\gamma^* = 0.04$.

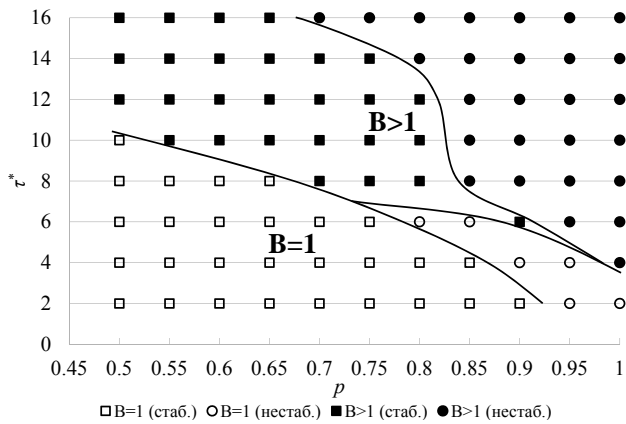


Рис. 4. Область эффективности блочной передачи при $\gamma^* = 0.02$.

между собой для всех станций цепочки. В случае, когда система передачи данных не является стабильной, наблюдается существенное изменение параметров резервирования для последующих станций цепочки.

В частности, рассматривался следующий эксперимент. Проведем поиск оптимальной схемы резервирования для многошагового маршрута длиной $N = 2$ и $N = 4$. Для всех каналов в цепочке будем считать вероятность успешной попытки передачи пакета одинаковой и равной $p = 0.9$. QoS-требования к потоку выберем такими, что $\gamma^* = 0.04$, $\tau^* = 40$. С учётом равномерного деления QoS-требований между станциями цепочки для двухшаговой цепочки получим $\tau_i^* = 20$, $\gamma_i^* \simeq 0.02$, а для четырехшаговой – $\tau_i^* = 10$, $\gamma_i^* \simeq 0.01$. Параметры полученных оптимальных схем резервирования для станций в цепочке приведены в таблице 1. Видно, что при стабильной схеме резервирования ($N = 4$) наблюдается установ-

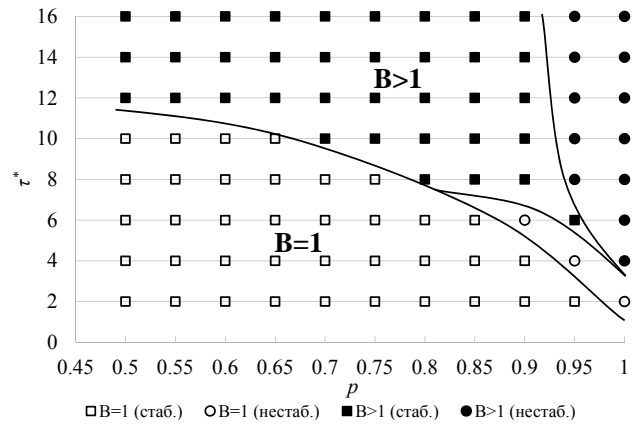


Рис. 5. Область эффективности блочной передачи при $\gamma^* = 0.01$.

Длина маршрута	Номер станции	α	B
$N = 2$	1	9.14	10
	2	6.47	7
$N = 4$	1	3.59	4
	2	3.51	4
	3	3.53	4
	4	3.54	4

Таблица 1. Параметры оптимального резервирования для станций в цепочке.

ление близких между собой размеров блока и периодов резервирования для каждой станции цепочки. В случае неустойчивости ($N = 2$) параметры резервирования разительно отличаются. В частности, на некотором шаге маршрута блочная передача может перестать быть эффективной. Исследование данного вопроса в рамках имитационного моделирования представляется сложной задачей.

6. Заключение

В работе построена имитационная модель, которая позволяет экспериментально определять оптимальные параметры резервирования между двумя станциями, а также для цепочки станций, составляющих многошаговый маршрут. С помощью разработанной имитационной модели установлена целесообразность использования блочной передачи трафика, чувствительного к задержкам, как в случае одношаговой передачи, так и в случае многошагового маршрута. Для одношаговой передачи указана область, в которой блочная передача эффективна. Показана эффективность блочной передачи по многошаговому маршруту в области стабильности.

Направлением для дальнейших исследований

является построение математической модели блочной передачи периодического трафика, чувствительного к задержкам, при условии, что станция-передатчик выбрасывает из очереди пакеты, у которых время пребывания на станции превышает соответствующее QoS-требование. Помимо этого стоит задача более глубокого исследования блочной передачи по многошаговым маршрутам. В частности, предполагается рассмотреть случай без допущения, что вероятности успешной передачи кадра одинаковы для всех каналов.

Список литературы

- [1] *IEEE P802.11s/D10.0. Draft STANDARD for Information Technology – Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications Amendment: Mesh Networking* [Electronic resource], 2011
- [2] *IEEE Std 802.11, 2007 Edition, Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specification*, June 2007
- [3] Lee, H., Timmirello, I., Yu, J., Choi, S. *A performance analysis of block ACK scheme for IEEE 802.11e networks*, Computer Networks 54, pp. 1-14, 2010
- [4] Li, T., Ni, Q., Turletti, T., Xiao, Y. *Performance analysis of the IEEE 802.11e block ACK scheme in a noisy channel*, 2nd International Conference on Broadband Networks, pp. 551-557, 2009
- [5] Cabral, O., Segarra, A., Velez, F.J., Mihovska, A., Prasad, N.R., *Optimization of multi-service IEEE802.11e block acknowledgement*, Radio and Wireless Symposium 2009 (RWS '09), pp.380-383, 18-22 Jan. 2009
- [6] GPSSWorld®, <http://www.minutemansoftware.com>