

АНАЛИЗ ЗАДЕРЖКИ ПЕРЕДАЧИ В ПАКЕТНЫХ РАДИОСЕТЯХ

А. П. Войтер

Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев, Украина

Предложена математическая модель для оценки задержки передачи сообщений в пакетных радиосетях. Рассмотрены гибкая и жесткая стратегии организации протоколов множественного доступа с контролем сигнала несущей. Проведен сравнительный анализ гибкого и жесткого протоколов по задержке передачи. Получена оценка соотношения между задержкой отложенной и постконфликтной передач при гибкой стратегии. Приведены результаты расчета в виде графических зависимостей задержки передачи.

A mathematical model for estimation of the transfer delay of communication in package radio networks has been proposed. Flexible and rigid strategies of multiple-access protocols organization with the carrier control are considered. A comparative analysis of flexible and rigid protocols for transfer delay is carried out. The estimation of the relationship between deferred and post-conflicted transfers at flexible strategy is obtained. The results of calculation in the form of graphic dependences of transfer delay are presented.

Введение

В пакетных радиосетях на MAC уровне (Media Access Control) применяют протоколы управления доступом к радиоканалу, основанные на процедурах множественного доступа с контролем сигнала несущей (МДКН). Существует большое количество таких протоколов [1]. Однако все они в той или иной степени являются модификацией базовых гибкого и жесткого протоколов МДКН, различающихся стратегией поведения абонентов при обнаружении занятого состояния радиоканала.

Гибкий протокол МДКН предусматривает проверку наличия сигнала несущей в радиоканале перед началом передачи. Если сигнал несущей отсутствует, то пакет может быть передан по радиоканалу. В противном случае абонент следует гибкой стратегии, в соответствии с которой передача откладывается на более позднее время, определяемое задержкой, которая выбирается случайным образом из заданного интервала. Перед повторными передачами абонент также проверяет наличие сигнала несущей, после чего выполняет указанные выше действия. Процедура назначения повторной передачи через случайный интервал времени оказывает положительное влияние лишь на большой трафик, поскольку возникает разравнивающий эффект. Однако при малом трафике эта процедура приводит к снижению эффективности использования радиоканала из-за достаточно длительного времени переноса повторной передачи. Устраняется этот недостаток в жестком протоколе МДКН, где при необходимости передача пакета также разрешается при отсутствии

сигнала несущей. Если же установлена занятость радиоканала, то абонент, следуя жесткой стратегии, не откладывает передачу, а непрерывно проверяет наличие несущей и после ее исчезновения немедленно начинает передачу.

При анализе протоколов МДКН основное внимание уделяется пропускной способности и устойчивости радиоканала [1]. Однако для абонентов сети более важным параметром является задержка передачи пакетов, определяемая количеством попыток, за которое пакет будет передан. При гибкой стратегии задержка передачи имеет две составляющие. Первая, которую будем называть задержкой отложенной передачи, обусловлена необходимостью повторной передачи через интервал случайной длительности в случае обнаружения занятого состояния радиоканала. Вторая, именуемая постконфликтной задержкой передачи, возникает в результате конфликта. Для жесткой стратегии характерным является отсутствие первой из указанных составляющих.

Представляет практический интерес сравнительная оценка задержки передачи для двух указанных стратегий с целью обоснованного выбора одной из них или для организации специальных процедур адаптивного управления на MAC уровне в зависимости от конкретных параметров сети и требований ко времени доставки пакетов.

Постановка задачи

Целью работы является сравнительный анализ гибкого и жесткого протоколов МДКН по задержке передачи, а также оценка степени вклада в суммар-

ную задержку передачи каждой из ее составляющих для гибкого протокола.

Для корректности анализа используем модель трафика, которая применялась для анализа базовых [2] и адаптивных протоколов [3, 4]. Согласно этой модели генерируемые абонентами пакеты малой интенсивности образуют трафик с пуассоновским распределением со средней скоростью поступления G пакетов одинаковой длины за единицу времени, в качестве которой принято нормированное время передачи одного пакета $T = 1$. Предполагается также, что нормированное по T время распространения радиосигнала между любой парой абонентов, именуемое интервалом уязвимости, равно a и соответствует времени распространения радиосигнала между наиболее удаленными абонентами сети. Радиоканал рассматривается как система с восстановлением, где циклом восстановления являются смежные интервалы занятого (со средним значением t_B) и свободного (со средним значением t_I) состояний. При этом вероятность занятого состояния радиоканала P_B определяется отношением средней длительности занятого состояния к средней длительности цикла восстановления.

Вероятность свободного состояния P_I находится как отношение средней длительности свободного состояния радиоканала к средней длительности цикла восстановления. В занятом состоянии радиоканала успешная передача возможна лишь в случае, когда после принятия решения некоторым абонентом о начале передачи другие абоненты в течение интервала уязвимости не начнут собственную передачу.

В рамках данной модели трафика задержка передачи пакетов (при гибком и жестком протоколах) определяется как среднее число попыток, предпринятых для достижения успешной передачи каждого пакета в условиях конкурентного доступа к радиоканалу:

$$D_n = 1 / (1 - P_n); D_p = 1 / (1 - P_p), \quad (1)$$

где P_n, P_p — вероятности повторной передачи для гибкого и жесткого протоколов МДКН, соответственно.

Вывод уравнений для вероятности повторной передачи

Для анализа характеристик протоколов МАС уровня пакетных радиосетей в настоящей работе выбран подход, основанный на получении средних значений распределений вероятностей. Он позволяет с достаточной для практики точностью оценить

средние значения скорости и задержки передачи, а также предельную величину интенсивности трафика, при которой сохраняется устойчивая работа сети.

Для проведения сравнительного анализа гибкого и жесткого протоколов МДКН по задержке передачи необходимо получить уравнения для оценки вероятности повторной передачи. Получим эти уравнения, основываясь на временной диаграмме работы радиоканала по гибкому протоколу МДКН, представленной на рис. 1. На этом рисунке наклонными стрелками вверх показаны поступающие запросы на передачу пакетов. Наклонные стрелки вниз обозначают отклоненные запросы из-за занятого состояния радиоканала.

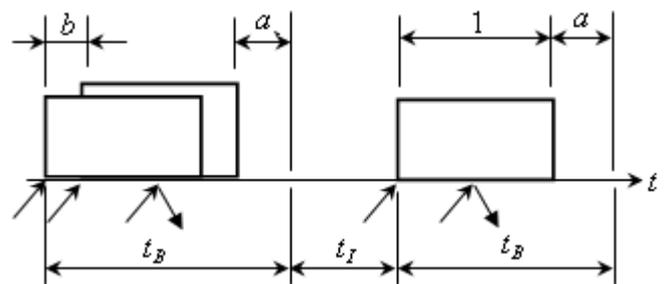


Рис. 1. Временная диаграмма работы радиоканала для гибкого протокола МДКН

Для гибкого протокола вероятность повторной передачи пакетов определяется совместной вероятностью нахождения радиоканала в занятом P_B и свободном P_I состояниях, а также вероятностью бесконфликтной передачи пакета P_{sn} , когда радиоканал свободный

$$P_n = P_B + (1 - P_{sn})P_I = 1 - P_{sn}t_I / (t_B + t_I). \quad (2)$$

Для принятой модели трафика согласно [2] среднее время пребывания радиоканала в свободном состоянии равно $t_I = 1 / G$, а среднее время занятого состояния определяется суммой

$$t_B = c + b = [G(1 + 2a) - 1 + \exp(-aG)] / G,$$

где $c = 1 + a$; b — среднее время от начала передачи до момента поступления последнего из конфликтующих пакетов при условии $r < a$, равное

$$b = \int_0^a r \frac{d}{dr} \left(e^{-[G(a-r)]} \right) = a - \frac{1 - e^{-aG}}{G}.$$

В случае бесконфликтной передачи пакета и при условии, что за время интервала уязвимости другие абоненты не начнут передачу, т. е. когда $P_{sn} = \exp(-aG)$, уравнение (2) может быть преобразовано к виду:

$$P_n = 1 - P_{sn} / [(1 + 2a)G + P_{sn}]. \tag{3}$$

Для жесткого протокола МДКН вероятность повторной передачи пакета определяется лишь вероятностью конфликта. Эта вероятность зависит от состояния радиоканала в момент поступления пакета и может быть представлена в виде:

$$P_p = P_I(1 - P_i) + P_B(1 - P_b).$$

С учетом соотношений для вероятностей нахождения радиоканала в занятом P_B и свободном P_I состояниях получаем

$$P_p = 1 - \frac{t_I P_i + t_B P_b}{t_B + t_I}, \tag{4}$$

где P_i — вероятность бесконфликтной передачи пакета, если он поступил в момент свободного состояния радиоканала; P_b — вероятность бесконфликтной передачи пакета, если он поступил в момент занятого состояния радиоканала; t_I, t_B — средние длительности свободного и занятого состояний канала для данного протокола.

Средняя длительность свободного состояния радиоканала определяется как произведение среднего количества следующих друг за другом свободных интервалов и длительности одного свободного интервала, который в данном случае равен интервалу уязвимости: $t_I = a / (1 - e^{-aG})$. Аналогично определяется и средняя длительность занятого состояния радиоканала, с той лишь разницей, что длительность одного интервала занятости равна c , и он же является интервалом уязвимости для конфликтующих пакетов: $t_B = c / e^{-cG}$.

Вероятности бесконфликтной передачи являются условными вероятностями того, что после начала передачи некоторым абонентом другие абоненты не начнут передавать свои пакеты в течение интервала уязвимости. Эти вероятности определяются следующими соотношениями:

$$P_i = aG / (1 - e^{-aG}); P_b = cG / (1 - e^{-cG}).$$

В гибком протоколе МДКН необходимость повторной передачи пакета может быть вызвана как занятым состоянием радиоканала, так и наличием конфликта при доступе к радиоканалу. Определим вклад отложенной и постконфликтной передач в общую задержку повторной передачи для этого протокола.

Как следует из (2), вероятность отложенной передачи равна

$$P_d = 1 - P_I, \tag{5}$$

а вероятность постконфликтной передачи может быть представлена в виде

$$P_r = (1 - e^{-aG})P_I, \tag{6}$$

где вероятность нахождения радиоканала в свободном состоянии определяется следующим соотношением:

$$P_I = t_I / (t_B + t_I) = [(1 + 2a)G + e^{-aG}]^{-1}.$$

Анализ задержки передачи

По формулам (3)—(6) проведены расчеты характеристик телекоммуникационной пакетной радиосети при величине интервала уязвимости $a = 0,01$, как и в [2]. Результаты расчетов представлены на рис. 2 — рис. 4. На рис. 2 показано соотношение вероятностей задержек в виде разности вероятностей повторной передачи для случаев жесткого и гибкого протоколов МДКН, построенное с использованием формул (3) и (4).

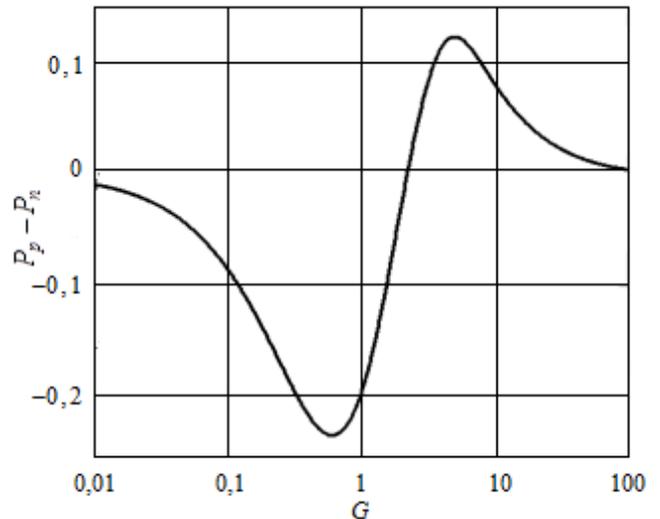


Рис. 2. Соотношение вероятностей задержек передачи пакетов при гибком и жестком протоколах МДКН

Рис. 2 иллюстрирует эффективность гибкой и жесткой стратегий передачи пакетов для разных интенсивностей трафика. В случае, если $G < 2$, жесткий протокол МДКН обеспечивает меньшую задержку передачи пакетов по сравнению с гибким протоколом. В области значений $G > 2$ преимуществом обладает гибкий протокол.

Максимальное преимущество жесткого протокола по отношению к гибкому протоколу имеет место в окрестности значения $G = 0,6$, при этом выигрыш в эффективности составляет 23 %. Преимущество гибкого протокола проявляется при значении $G = 5$ с выигрышем по эффективности применения около

12 %. В областях значений $G = 2$, $G < 0,01$ и $G > 100$ эти протоколы равноценны в отношении задержки передачи пакетов.

На рис. 3. представлена иллюстрация степени вклада задержки отложенной передачи (5) и задержки постконфликтной передачи (6) в задержку повторной передачи при гибком протоколе МДКН.

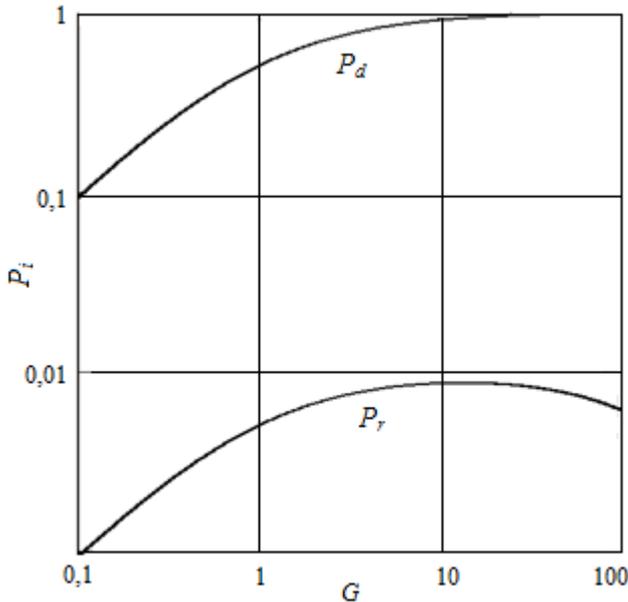


Рис. 3. Вероятности отложенной и повторной передач

Видно, что около 0,99 вероятности задержки повторной передачи практически во всем диапазоне изменения интенсивности трафика обусловлено задержкой отложенной передачи вследствие занятого состояния радиоканала. Вклад вероятности постконфликтных повторных передач в общую вероятность задержки повторной передачи не превышает 0,01.

Рассчитанные по соотношениям (1) задержки передачи в виде среднего количества попыток, предпринятых для передачи каждого пакета, в зависимости от интенсивности трафика представлены на рис. 4. Как следует из рисунка, при относительно низкой интенсивности трафика, когда $G < 2$, преимущество сохраняет жесткий протокол МДКН. Если $G = 2$, оба протокола равнозначны и успешная передача каждого пакета осуществляется в среднем за 3 раза. При значениях $G > 2$ гибкий протокол имеет преимущество, которое возрастает с увеличением параметра G . Например, при жестком протоколе МДКН со значением $G = 4$ каждый пакет успешно передается в среднем за 13 попыток, в то время как в случае использования гибкого протокола для этой передачи достаточно всего 6 попыток.

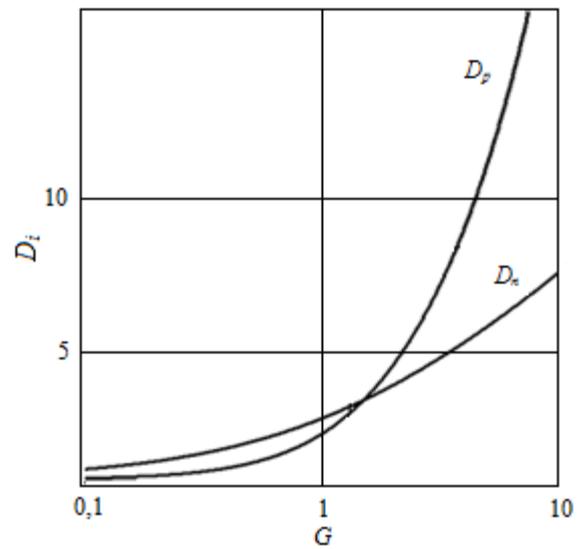


Рис. 4. Задержка передачи для жесткого и гибкого протоколов МДКН

Заключение

Результаты проведенного анализа позволяют при организации управления множественным доступом к радиоканалу осуществлять обоснованное применение гибкой или жесткой стратегии в зависимости от диапазона изменения интенсивности трафика. Показано, что для гибкой стратегии задержка передачи определяется в основном задержкой отложенной передачи, а влияние постконфликтной задержки незначительно.

Предложенный подход может найти применение для исследования задержки передачи для других протоколов MAC уровня, в том числе и адаптивных, что даст возможность оптимизировать работу сети не только по критерию эффективности использования ее пропускной способности, но и по задержке доставки сообщений

Литература

1. Ильченко М. Е., Бунин С. Г., Войтер А. П. Сотовые радиосети с коммутацией пакетов. — К.: Наукова думка, 2003. — 266 с.
2. Kleinrock L., Tobagi F. A. Packet switching in radio channels: Part I — Carrier sense multiple-access modes and their throughput-delay characteristics // IEEE Transactions on Communications. — 1975. — Vol. 23, N. 12. — P. 1400—1416.
3. Войтер А. П. Управление задержкой передачи в пакетных радиосетях // Управляющие системы и машины. — 2007. — № 4. — С. 81—84.
4. Войтер А. П. Фрагментация конфликтов в пакетных радиосетях // Управляющие системы и машины. — 2007. — № 5. — С. 76—80.

Поступила после переработки 17.08.2010