

DOI <https://doi.org/10.15407/usim.2018.02.080>

УДК 621.39

А.П. ВОЙТЕР, д-р техн. наук, зам.директора,
Ин-т ядерных исследований НАН Украины, Киев, просп. Науки, 47, Киев, 03028, Украина
voiter@kirn.kiev.uf

ЭФФЕКТИВНОСТЬ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ДЛИНОЙ КАДРОВ В РАДИОСЕТЯХ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ

Предложена математическая модель для расчета эффективной скорости передачи на канальном уровне радиосетей при использовании адаптивного протокола множественного доступа с контролем сигнала несущей и переменной длины кадров данных с учетом комплексного влияния интенсивности ошибок в радиоканале и формата пакетов.

Ключевые слова: радиосети, адаптивное управление, математическая модель, длина пакетов.

Введение

Необходимость адаптивного управления в радиосетях передачи данных обусловлена значительным влиянием на них дестабилизирующих факторов, важнейшее из которых — нестабильность передающей среды и колебания интенсивности трафика. Они приводят к неустойчивой работе протоколов конкурентного доступа к радиоканалу и, как следствие, — к снижению эффективной скорости передачи. Одним из параметров адаптации является длина кадров данных, передаваемых в радиосети. Оптимизация эффективности передачи данных путем изменения длины кадров обычно осуществляется на физическом и канальном уровнях архитектуры радиосетей [1–5]. На физическом уровне логической структуры радиосети процедуры адаптации сводятся к выбору оптимального для текущего значения интенсивности ошибок в радиоканале размера длины кадров, которая обеспечивает требуемую вероятность его бесконфликтной передачи. Канальный уровень радиосетей передачи данных содержит два протокола: *прото-*

кол управления логическим каналом (LLC — Logical Link Control) и протокол управления доступом к радиоканалу (MAC — Medium Access Control). LLC-протокол, кроме установленных в нем процедур, представляет также форматы кадров, в которых определенная фиксированная часть является служебной информацией, переменной частью служат собственно передаваемые данные. Эффективность передачи этого протокола определяется соотношением длины информационной части кадра к общей длине кадра.

Важнейший элемент архитектуры радиосетей — это *MAC-протоколы*, регламентирующие коллективное использование радиоканала. Базовыми протоколами принято считать *протоколы множественного доступа с контролем несущей (МДКН)* [1]. Эти протоколы изначально были рассчитаны на передачу кадров данных фиксированной длины. Из-за возможных конфликтов, обусловленных конечным временем распространения радиосигнала в сети, и случайным распределением времени поступления кадров для передачи, эффективность этих протоколов определяется вероят-

ностью бесконфликтной передачи кадров. Протоколы МДКН имеют предел устойчивости — значение интенсивности поступлений кадров, при которой количество конфликтов начинает преобладать над количеством бесконфликтных передач, что снижает эффективную скорость. Для расширения предела устойчивости, а также с целью повышения эффективности передачи был предложен ряд адаптивных МДКН-протоколов [6–8]. Так, например, в [6] предложен адаптивный МДКН-протокол с переменной длиной кадров и жесткой стратегией доступа. В этом протоколе абоненты должны различать три состояния радиоканала:

- занятое, когда детектируется сигнал несущей;
- состояние разрешения передачи (сигнал несущей отсутствует в течение времени не более, чем время распространения радиосигнала в сети);
- свободное состояние (сигнал несущей отсутствует больше времени распространения радиосигнала в сети).

При поступлении кадра данных для передачи, когда радиоканал занят, протокол ожидает освобождения, постоянно проверяя сигнал несущей (так называемая жесткая стратегия), и как только радиоканал освободится, начинает передачу кадра.

В состоянии разрешения передачи абонент имеет право передать кадр установленного размера. В свободном состоянии разрешена передача кадра большей длины.

Такая организация передачи дает возможность передавать кадры установленной (фиксированной) длины при интенсивном трафике, а при снижении интенсивности, когда возникают паузы в трафике длиной более чем время распространения радиосигнала в сети, передавать кадры большей длины. Доказано [6], что увеличивая длину кадров, передаваемых в свободном состоянии радиоканала, этот протокол может обеспечивать рост пропускной способности радиоканала до 85 процентов. Но, очевидно, что такое увеличение длины кадров данных приведет к снижению эф-

фективности их передачи на физическом уровне (уменьшится вероятность успешной передачи кадра при заданной интенсивности ошибок в радиоканале).

Постановка задачи

Цель работы — получение математической модели эффективности передачи жесткого адаптивного МДКН-протокола с переменной длиной кадров [6] с учетом влияния физического уровня и LLC-протокола. Эффективность передачи при заданной физической скорости передачи V бит/с определим в виде функции:

$$C = VC_M(P_M, C_{PLr}), \quad (1)$$

где C_M — коэффициент эффективности МДКН-протокола с учетом комплексного влияния вероятности бесконфликтной передачи кадров P_M , определяемой процедурами МДКН-протокола, и коэффициента совместной эффективности физического уровня и LLC-протокола C_{PL} , который в свою очередь зависит от вероятности успешной передачи кадра P_p на физическом уровне радиосети, от коэффициента изменения длины кадров r и от коэффициента эффективности C_L принятого формата кадра.

Математическая модель

При определении P_p и C_L воспользуемся результатами [7]. При заданной вероятности p ошибки на один бит в радиоканале, вероятность безошибочной передачи кадра равна

$$P_p = (1 - p)^{(n+c)},$$

где $L = n + c$, n — количество бит в информационной части кадра, c — длина его служебной части.

Коэффициент эффективности передачи LLC-протокола определяется соотношением длины информационной части кадра к общей его длине $C_L = \frac{n}{L}$. Тогда общий коэффициент эффективности передачи физического

уровня и уровня *LLC* будет определяться уравнением

$$C_{PL} = P_p C_L = \frac{n(1-p)^{(n+c)}}{L} \quad (2)$$

Очевидно, при фиксированном значении длины служебной части кадра эффективная скорость передачи возрастает с увеличением его информационной длины. В то же время при увеличении длины кадра снижается вероятность его успешной передачи P_p , т.е. задача повышения эффективности передачи должна решаться на основе компромисса в удовлетворении противоречивых требований физического уровня и протокола *LLC*.

Для каждого значения вероятности ошибки в радиоканале существует оптимальная длина информационной части кадра n_o , что следует

из условия $\frac{dC_{PL}}{dn} = 0$:

$$n_o = \frac{-c \ln(1-p) - \sqrt{(c \ln(1-p))^2 - 4c \ln(1-p)}}{2 \ln(1-p)}.$$

Тогда оптимальная длина кадра: $L_o = n_o + c$.

Для заданного протокола канального уровня длина служебной части кадра фиксирована, а изменение r длины кадра L относительно оптимальной, когда $n = n_o$, осуществляется изменением значения n

$\frac{n+c}{n_o+c} = r$. Отсюда изменением значения n

длины кадра в r раз можно достичь при $n = rn_o + (r-1)c$. Тогда для переменного n уравнение (2) принимает вид:

$$C_{PLr} = \frac{[rn_o + (r-1)c](1-p)^{r(n_o+c)}}{r(n_o+c)}. \quad (3)$$

Получим коэффициент эффективности для рассматриваемого жесткого адаптивного протокола, используя модель для анализа базовых протоколов МДКН [1] и, учитывая, что время передачи кадра оптимальной длины равно $T_o = \frac{L_o}{V}$, время передачи кадра, увеличенной в

r раз длины, равно $T_r = rT_o$, где $r > 1$. Эта модель строится с применением элементов теории восстановления и предположения, что количество абонентов бесконечно велико,

каждый из которых генерирует кадры с бесконечно малой скоростью. Последнее фактически является предположением о пуассоновском характере процесса поступления кадров для передачи по радиоканалу с суммарной интенсивностью λ кадров/с. Данная модель оперирует со средними значениями временных отрезков состояния радиоканала.

Временная диаграмма работы радиоканала по рассматриваемому жесткому адаптивному МДКН-протоколу представлена на рис. 1.

Очевидно, что радиоканал может пребывать в одном из двух возможных состояний — занятом со средней продолжительностью B , когда в радиоканале осуществляется передача кадров и функционирует сигнал несущей, и свободном со средней продолжительностью I , когда передача кадра разрешена и содержит в данном случае также и состояние разрешения передачи. В свою очередь занятое состояние может отображать два события: бесконфликтную эффективную передачу кадров данных со средней продолжительностью U , и одновременную передачу нескольких кадров данных, когда происходит их взаимное разрушение.

Время поиска радиоканала в состоянии бесконфликтной передачи кадров данных отождествляется с полезным использованием радиоканала. Занятое и свободное состояние радиоканала поочередно меняются, образуя циклы восстановления.

Вероятность успешной передачи кадров МДКН-протокола определим как отношение среднего интервала бесконфликтной передачи в цикле восстановления к продолжительности этого цикла:

$$P_M = \frac{U_M}{B+I} \quad (4)$$

Пусть радиоканал находится в свободном состоянии. Тогда при поступлении кадра первая передача в интервале занятости будет иметь длину rT_o , а все последующие — оптимальную, т.е. равную T_o . Следовательно, среднее количество передач в занятом периоде равно:

$$m = \frac{e^{-(rT_o+a)\lambda} + 2(1 - e^{-(rT_o+a)\lambda})e^{-(T_o+a)\lambda} + e^{-(T_o+a)\lambda}(1 - e^{-(rT_o+a)\lambda})(e^{2(T_o+a)\lambda} + 2e^{-(T_o+a)\lambda} - 3)}{1 - e^{-(T_o+a)\lambda}},$$

где a – интервал уязвимости, т.е. максимальное время распространения радиосигнала в сети.

Тогда $B = rT_o + a + (m - 1)(T_o + a)$.

Для принятой модели графика [1]

$$I = \frac{ae^{-a\lambda}}{1 - e^{-a\lambda}}.$$

Вероятность бесконфликтной передачи первого кадра в занятом интервале равна условной вероятности поступления ровно одного кадра за интервал a свободного периода. Вероятность бесконфликтной передачи второго кадра равна условной вероятности поступления ровно одного кадра за интервал $rT_o + a$, последующих кадров – за интервал $T_o + a$. С учетом этого средняя длительность бесконфликтной передачи кадров в цикле восстановления, определяемая исключительно процедурами МДКН-протокола, равна:

$$U_M = \frac{rT_o a \lambda e^{-a\lambda}}{1 - e^{-a\lambda}} + \frac{T_o \lambda (rT_o + a) e^{-(rT_o + a)\lambda}}{1 - e^{-(rT_o + a)\lambda}} + (m - 2) \frac{T_o \lambda (T_o + a) e^{-(T_o + a)\lambda}}{1 - e^{-(T_o + a)\lambda}}. \quad (5)$$

Подставив значения U_M , B , I в (4), получим значение P_M .

Для того чтобы учесть влияние эффективности передачи физического уровня радиосети и LLC-протокола, необходимо умножить первое слагаемое в уравнении (5) на значение C_{PLr} из (3), а два последующих – на значение C_{PL} (2), соответствующее оптимальной длине

кадров, т.е. при $r = 1$. Тогда $C_M = \frac{U}{B + I}$, где

$$U = \frac{rT_o a \lambda e^{-a\lambda} C_{PLr}}{1 - e^{-a\lambda}} + \frac{n_o (1 - p)^{(n_o + c)}}{n_o + c} \times \left[\frac{T_o \lambda (rT_o + a) e^{-(rT_o + a)\lambda}}{1 - e^{-(rT_o + a)\lambda}} + (n - 2) \frac{T_o \lambda (T_o + a) e^{-(T_o + a)\lambda}}{1 - e^{-(T_o + a)\lambda}} \right].$$

Подставляя значение C_M в (1), приходим к уравнению эффективности передачи.

На рис. 2 представлен график $C(\lambda, r)$, иллюстрирующий изменение эффективности передачи при изменении интенсивности трафика

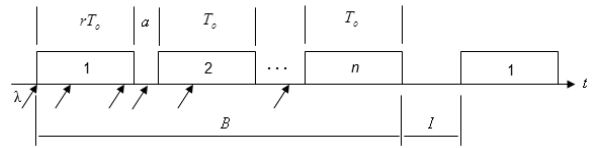


Рис. 1. Временная диаграмма работы радиоканала

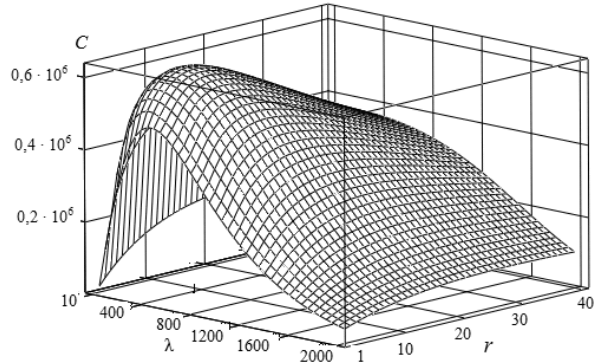


Рис. 2. Комплексная эффективная скорость передачи

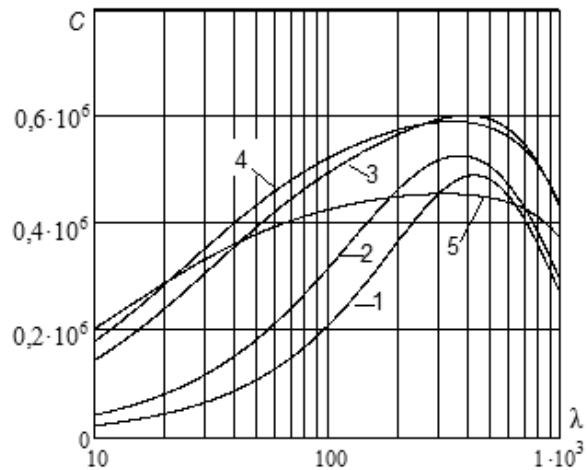


Рис. 3. Зависимость комплексной эффективной скорости передачи от интенсивности трафика при фиксированных значениях r . 1 – для $r = 1$; 2 – для $r = 2$; 3 – для $r = 10$; 4 – для $r = 15$; 5 – для $r = 30$.

и коэффициента увеличения длины кадров данных, передаваемых в свободном состоянии (при $p = 10^{-5}$, $V = 10^6$ бит/с, $a = 10^{-4}$). На рис. 3 представлено сечение плоскости $C(\lambda, r)$ для ряда значений r . Видно, что с увеличением длины кадров данных сначала наблюдается

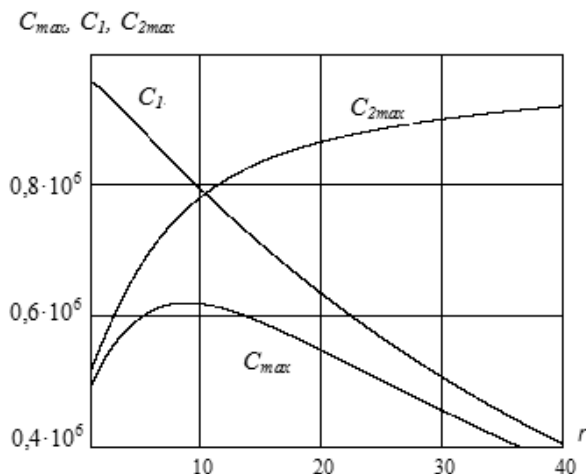


Рис. 4. Зависимость эффективности передачи от коэффициента изменения длины кадров данных

рост пропускной способности сети (максимального значения эффективной скорости передачи C_{max}), а при $r > 10$ пропускная способность снижается.

Более подробно это показано на рис. 4 в виде зависимости максимального значения эффективности передачи C_{max} , эффективности совместной передачи канального и физического уровней $C_1 = VC_{PLr}$, а также максимального значения $C_{2max} = \frac{VU_M}{B+I}$ процедур адаптивного МДКН-протокола от коэффициента увеличения длины кадра.

Из этого графика видно, что адаптивный МДКН-протокол с жесткой стратегией сам по себе обеспечивает экспоненциальный рост эффективности передачи при увеличении длины кадров данных до 85 процентов (C_{2max}), в то время как эффективность передачи физического уровня и LLC-протокола C_1 с увеличением длины кадров снижается помехами в радиоканале. В результате эффективность передачи C_{max} повышается с ростом длины кад-

ров до определенного предела (в данном случае до $r = 8$) и затем снижается. Таким образом, для заданного значения системных параметров возможен рост комплексной эффективности передачи от $0,49 \cdot 10^6$ бит/с до $0,62 \cdot 10^6$ бит/с, т.е. лишь на 26,5 процента, что составляет около 30 процентов потенциальной возможности МДКН-протокола.

Заключение

Адаптивное управление на канальном уровне осуществляется с целью максимального использования пропускной способности радиосети для заданного набора значений ее параметров, таких как скорость передачи данных на физическом уровне, вероятность повреждения одного бита информации помехами в радиоканале, размер радиосети и структура кадра LLC-протокола. Для практического осуществления адаптивного управления длиной кадров может быть использована предложенная математическая модель, позволяющая рассчитать оптимальный размер кадров данных для LLC-протокола и допустимое его увеличение в адаптивных процедурах МДКН-протокола с жесткой стратегией доступа к радиоканалу. Кроме того, модель позволяет рассчитать комплексную эффективность передачи на канальном уровне радиосетей передачи данных, а также ее пропускную способность при использовании жесткого адаптивного МДКН-протокола при переменной длине кадров с учетом ограничений на их длину со стороны физического уровня сети и LLC-протокола. Показано, что эффективность рассмотренного адаптивного МДКН-протокола при комплексном его использовании ограничена на уровне 30 процентов его потенциальной возможности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Самоорганизующиеся радиосети со сверхширокополосными сигналами, С.Г. Бунин, А.П. Войтер, М.Е. Ильченко и др., К.: Наук. думка, 2012, 444 с.
2. Поляк М.Г., Мишуров А.В. Методы оптимизации передачи информации в системах спутниковой связи, Исследования наукограда, 2016, № 3–4 (18), С. 50–52.

3. Кулик А.Я. Визначення параметрів передавання інформації в розподілених комп'ютерних системах, Вісн. Хмельн. нац. ун-ту, 2010, № 5, С. 212–215.
4. Гуляев К.Д., Кантур В.А., Тихонов В.И. Принципы организации адаптивной взаимодействия открытых систем, Наук. вісті Нац. техн. ун-ту України “Київський політехнічний інститут”, 2012, № 2, С. 7–15.
5. Raisinghani V.T., Iyer S., “Cross-layer design optimizations in wireless protocol stacks”, Computer Communications, May 2004, 27, P. 720–724.
6. Бунин С.Г., Войтер А.П. Адаптивні протоколи множинного доступу зі змінною довжиною пакетів, Наук. вісті Нац. техн. ун-ту України “Київський політехнічний інститут”, 2007, № 5, С. 25–29.
7. Войтер А.П. Комплексний аналіз ефективної швидкості передачі в адаптивних пакетних радіомережах, Там же, 2013, № 6, С. 7–12.
8. Войтер А.П. Вплив стратегій управління довжиною пакетів на ефективність MAC-рівня пакетних радіомереж, Там же, 2012, № 6, С. 7–12.

Поступила 26.06.2018

REFERENCES

1. Bunin S.G. et al., Self-Organizing Radio Networks with Ultra-Wideband Signals. Kyiv, Ukraine: Naukova Dumka, 2012 (in Russian).
2. Polyak M.G., Mishurov A.V., Issledovanija naukograda (Research of science city), 2016, N 3–4 (18), P. 50–52 (in Russian).
3. Kulik A.J., Visnik, Visnik Chmel'nitskogo Nazionalnogo Universitetu (Herald of Khmelnytskyi national university), 2010, N 5, P. 212–215 (in Ukrainian).
4. Gulyaev K.D. et al., Naukovi Visti NTUU KPI, 2012, N 2, P. 7–15, (in Ukrainian).
5. Raisinghani V.T., Iyer S., Computer Communications, Volume 27, May 2004, P. 720–724.
6. Bunin S.G. and Voiter A.P., Naukovi Visti NTUU KPI, 2007, N 5, P. 25–29 (in Ukrainian).
7. Voiter A.P., Naukovi Visti NTUU KPI, 2013, N 6, P. 7–12 (in Ukrainian).
8. Voiter A.P., Naukovi Visti NTUU KPI, 2012, N 6, P. 7–12 (in Ukrainian).

Received 26.06.2018

Anatolii P. Voiter, Dr. Sc. (Technology), Deputy Director, Institute for Nuclear Research
National Academy of Sciences of Ukraine, pr.Nauky,47, Kyiv, 03028, Ukraine, voiter@kinr.kiev.ua

EFFECTIVENESS OF ADAPTIVE MANAGEMENT OF PACKETS LENGTH IN RADIO NETWORKS OF THE DATA TRANSMIT

Introduction. A mathematical model is described for calculating the effective transmission rate at the channel level of radio networks using an adaptive CSMA protocol with variable length of data packets, taking into account the influence of the error rate in the radio channel and the packet format.

Purpose The aim of the work is to determine the efficiency of the channel level of radio networks using an adaptive CSMA protocol with variable packet length and a rigid access strategy to the radio channel, taking into account the limitations on the length of packets on the part of the LLC protocol and the physical layer.

Methods An equation is obtained for the effective transmission rate as a function of the physical transmission rate in the radio channel, the probability of successful transmission of the packet for a given error rate in the radio channel, the packet structure, and the probability of a contention-free CSMA protocol with adaptive packet length control.

Results The mathematical model makes it possible to calculate the optimal size of data packets for LLC protocol and its allowable increase in adaptive CSMA protocol procedures, the effective transmission rate at the channel layer of the packet radio network, and its throughput. It is shown that the efficiency of the considered adaptive CSMA protocol in its integrated use is limited at the level 30% of its potential.

Conclusion. The proposed mathematical model can be used for practical implementation of adaptive control of length of the packet in radio networks of data transmission in order to optimize the effective transmission rate.

Keywords: radio networks, adaptive control, mathematical model, packet length.

А.П. Войтер, д-р техн. наук, зам. директора,
Інститут ядерних досліджень НАН України, просп. Науки, 47, Київ, 03028, Україна,
voiter@kinr.kiev.ua

ЕФЕКТИВНІСТЬ АДАПТИВНОГО УПРАВЛІННЯ ДОВЖИНОЮ КАДРІВ У РАДІОМЕРЕЖАХ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ

Вступ. Описано математичну модель для обчислення ефективності передачі на каналному рівні радіомереж, в яких використовується адаптивний протокол множинного доступу з контролем несучості (МДКН) з змінною довжиною кадрів даних, з урахуванням впливу частоти помилки в радіоканалі та формату кадрів.

Мета. Визначення ефективності передачі адаптивного протоколу МДКН із змінною довжиною кадрів та жорсткою стратегією доступу до радіоканалу з урахуванням обмежень на довжину кадрів з боку фізичного рівня мережі та протоколу (*Logical Link Control — LLC*).

Методи. Отримано математичну модель ефективності передачі у вигляді функції фізичної швидкості передачі в радіоканалі, ймовірності успішної передачі кадра для заданої частоти помилок в радіоканалі, структури пакета та ймовірності безконфліктної передачі кадрів для протоколу МДКН з адаптивним керуванням довжиною кадру.

Результати. Математична модель дає змогу обчислити оптимальний розмір кадрів даних для протоколу *LLC* та його допустиме збільшення в адаптивних процедурах протоколу МДКН, ефективність передачі на каналному рівні радіомережі та її пропускну спроможність. Показано, що ефективність розглянутого адаптивного протоколу *CSMA* при його інтегрованому використанні обмежена на рівні 30 відсотків його потенціалу.

Висновок. Запропонована математична модель може бути використана для практичної реалізації адаптивного управління довжини кадрів в радіомережах передачі даних з метою оптимізації ефективності передачі.

Ключові слова: радіомережі, адаптивне управління, математична модель, довжина кадрів.