

ЕЛЕКТРОНІКА, РАДІОТЕХНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

УДК 621.39

А.П. Войгер

КОМПЛЕКСНИЙ АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОЇ ШВИДКОСТІ ПЕРЕДАЧІ В АДАПТИВНИХ ПАКЕТНИХ РАДІОМЕРЕЖАХ

The aim of the study is to evaluate the effectiveness of joint work of physical and link layer packet radio networks with adaptive control of length of data packets in a competitive access to the radio channel. To do this, an analytical model in the form of two equations, the first of which determines the probability of successful transmission at the physical and data link layer, as a function of the intensity of the errors in the channel and protocol redundancy package format. The second equation is the probability of conflict-free transmission is a function of the length of the data packets and traffic load for non-persistent Carrier Sense Multiple Access protocol. Comprehensive analysis of equations determined the optimal length of the package and the effective rate of transmission. Proved that the adaptive management of multiple access protocol should be based solely on the procedures for increasing the length of packets on the optimal values for the data link protocol. The proposed mathematical model can be used in adaptive protocols packet radio networks to calculate the optimal values of the length of data packets with the combined effect of physical and link layer network with concurrent access to the radio channel, and to calculate the effective data rate for each set of system parameters.

Вступ

Стабільність роботи радіомереж із пакетною комутацією (пакетних радіомереж) забезпечується адаптивними методами керування на різних рівнях їх архітектури [1–4], які запобігають перевантаженню та підтримують високу ефективність швидкості передачі даних. Ефективна швидкість передачі завжди нижча фізичної швидкості передачі головним чином через наявність у радіоканалі перешкод різної природи, протокольної надмірності у форматах пакетів і процедурах протоколів різного рівня. Перешкоди в радіоканалі призводять до неминучих пошкоджень пакетів на фізичному рівні та необхідності їх повторної передачі або запровадження кодової надмірності для виправлення помилок у пакетах. Канальний рівень пакетних радіомереж, що містить підрівень керування логічним каналом (LLC – Logical Link Control) і підрівень керування доступом до радіоканалу (MAC – Medium Access Control), також знижує ефективну швидкість передачі, зокрема через надлишкову інформацію у форматах пакетів даних LLC-протоколу і внаслідок конфліктів, що виникають у MAC-протоколі при використанні конкурентних процедур доступу. Слід відзначити, що аналіз ефективної швидкості передачі при адаптивному керуванні здійснюється, як правило, для кожного протоколу окремо без урахування впливу чи обмежень з боку інших протоколів. Загальний аналіз ефективної швидкості передачі для повного стека протоколів, очевидно, є непростою задачею, але для двох протоколів нижнього рівня не-

складно отримати аналітичну модель їх спільної роботи.

Постановка задачі

Метою роботи є побудова аналітичної моделі для оцінки ефективності спільної роботи фізичного та канального рівнів пакетних радіомереж з адаптивним керуванням довжиною пакетів даних.

Математична модель

Очевидно, що на фізичному рівні ймовірність успішної передачі пакета залежить від інтенсивності помилок у радіоканалі і зростає зі зменшенням довжини пакета та, відповідно, знижується при її збільшенні. З другого боку, LLC-протокол канального рівня, навпаки, зменшує (збільшує) свою ефективну швидкість передачі при скороченні (збільшенні) довжини пакета внаслідок наявності фіксованих полів службової інформації у форматах пакетів даних.

Ефективну швидкість передачі C у пакетній радіомережі за заданої фізичної швидкості передачі V визначимо з урахуванням комплексного впливу фізичного рівня, який характеризується ймовірністю P_p успішної передачі пакета, і канального рівня, ефективна швидкість C_L якого визначається спільним впливом прийнятого формату кадру в протоколі LLC і ймовірністю P_M успішної передачі протоколу керування доступом до радіоканалу (протоколу

MAC). Тоді загальне рівняння ефективної швидкості передачі можна записати так:

$$C = VP_p C_L P_M. \quad (1)$$

Визначимо спільну ефективну швидкість передачі фізичного рівня та протоколу LLC. За заданої ймовірності p помилки на один біт у радіоканалі ймовірність безпомилкової передачі пакета визначається його довжиною (кількістю біт) $L = n + c$, де n – довжина інформаційної частини пакета, c – довжина службової частини пакета (протокольна надмірність): $P_p = (1 - p)^{(n+c)}$.

Ефективна швидкість передачі LLC-протоколу визначається співвідношенням довжини інформаційної частини пакета до загальної довжини пакета: $C_L = \frac{n}{L}$. Тоді спільна ефективна швидкість передачі фізичного рівня та рівня LLC буде визначатися рівнянням $C_{PL} = P_p C_L = \frac{n(1-p)^{(n+c)}}{L}$.

Очевидно, при фіксованому значенні довжини службової частини пакета ефективна швидкість передачі зростає зі збільшенням його інформаційної довжини. У той же час при збільшенні довжини пакета знижується ймовірність його успішної передачі P_p , тобто задача підвищення ефективної швидкості передачі має розв'язуватися на основі компромісу в задоволенні суперечливих вимог фізичного рівня і протоколу LLC.

На рис. 1 зображено графік залежності $C_{PL}(n)$ при $c = 50$ і трьох значеннях ймовірнос-

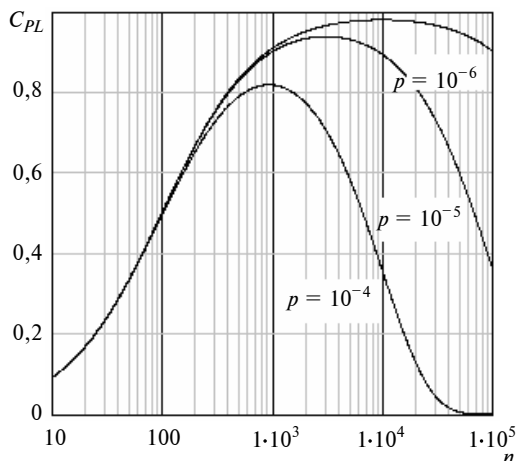


Рис. 1. Вплив довжини пакета на ефективну швидкість передачі фізичного рівня і LLC

ті помилки на біт p , який ілюструє існування оптимальної довжини інформаційної частини пакета n_o для кожного значення ймовірності помилки в радіоканалі.

Значення n_o нескладно отримати з умови

$$\frac{dC_{PL}}{dn} = 0:$$

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

Тоді оптимальна довжина пакета становить $L_o = n_o + c$.

У табл. 1 наведено кілька значень n_o для різних ймовірностей p , обчислених за формулою (2), які будуть використані далі при розрахунках системних параметрів, а на рис. 2 зображено графік залежності $n_o(p)$.

Таблиця 1. Оптимальна довжина інформаційної частини пакета

p	10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}
n_o	7046	2211	682	200

Для заданого протоколу каналного рівня довжина службової частини пакета фіксована, і варіація r довжини пакета L відносно оптимального, коли $n = n_o$, здійснюється зміною значення n : $\frac{n+c}{n_o+c} = r$. Звідси зміни довжини

пакета в r разів можна досягти при $n = rn_o + (r-1)c$. Тоді для змінного n можна записати

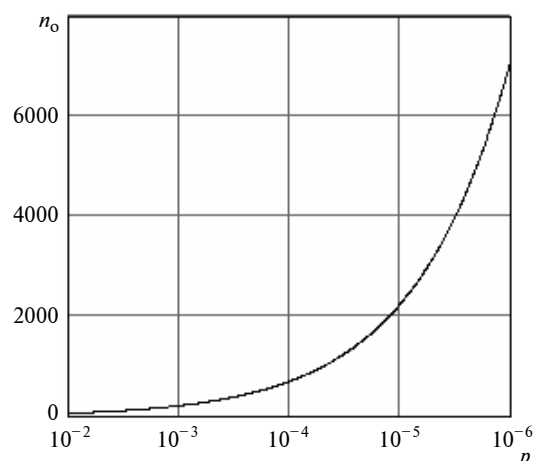


Рис. 2. Вплив ймовірності помилки в радіоканалі на оптимальну довжину пакета

$$C_{PL} = \frac{[rn_0 + (r-1)c](1-p)^{r(n_0+c)}}{r(n_0+c)}. \quad (3)$$

На рис. 3 показано графік залежності $C_{PL}(r)$, з якого видно, що для каналу з імовірністю помилки $p = 10^{-5}$ при зменшенні (збільшенні) загальної довжини пакета від оптимального в десять разів ефективна швидкість передачі знижується приблизно на 20 % (17 %), при $p = 10^{-4}$ – на 64 % (45 %) і при $p = 10^{-6}$ – на 5 % (5 %).

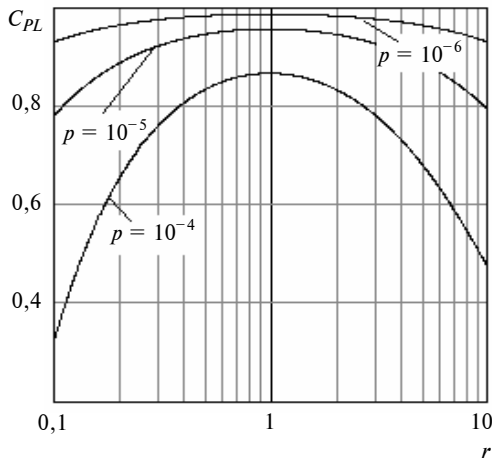


Рис. 3. Вплив довжини пакета на спільну ефективну швидкість передачі фізичного рівня і рівня LLC

Ефективна швидкість MAC-протоколу залежить як від процедур і довжини пакетів самого протоколу, так і від інтенсивності трафіку. Існує багато MAC-протоколів, найбільш відомим з яких і простим у реалізації є гнучкий протокол множинного доступу з виявленням сигналу несучої (гнучкий МДКН-протокол). Процедури гнучкого протоколу МДКН полягають у тому, що [5]: перед початком передачі абонент повинен перевірити наявність сигналу несучої в радіоканалі. Якщо сигнал несучої відсутній, то пакет передається. В іншому випадку передача відкладається на певний інтервал часу випадкової тривалості. Перед повторними передачами також перевіряють наявність сигналу несучої і виконують зазначені вище дії. Після початку передачі протягом інтервалу вразливості a , рівного часу поширення радіосигналу в мережі, інші абоненти, не відчуваючи сигналу несучої, можуть почати власну передачу, що призведе до накладання пакетів і їх взаємного руйнування. Пакети, які потрапили в конфлікт, передаються повторно через випадковий інтервал часу.

Отримаємо рівняння ймовірності безконфліктної передачі для гнучкого протоколу МДКН при довжині пакетів даних L . Для спрощення аналізу зазвичай припускають, що пакети, які надходять для передачі, та пакети, передача яких відкладена через наявність сигналу несучої або через необхідність повторної передачі, утворюють єдине джерело надходження пакетів з інтенсивністю λ [6]. Час передачі одного пакета становить $T = \frac{L}{V}$. Процес

зміни станів пакетної радіомережі описується одновимірним ланцюгом Маркова з неперервним часом. Для гнучкого протоколу МДКН радіомережа може перебувати в одному з чотирьох станів: вільному ($k = 0$), вразливості ($k = 1$), безконфліктної передачі ($k = 2$) і передачі пакетів у конфлікті ($k = 3$).

Розглянемо ймовірності переходів між станами радіоканалу з довільного часу t за нескінченно малий інтервал Δt .

1. Якщо радіоканал перебуває в стані $\{0\}$, тобто радіоканал вільний, то:

- з імовірністю $\lambda \Delta t$ за інтервал часу Δt з вхідного потоку надійде новий пакет, який негайно займе радіоканал, що призведе до його переходу в момент часу $1 + \Delta t$ в стан $\{1\}$.

- з імовірністю $1 - \lambda \Delta t$ стан радіоканалу не зміниться.

2. Якщо радіоканал перебуває в стані $\{1\}$, тобто в інтервалі вразливості, то:

- з імовірністю $\frac{\Delta t}{a}$ інтервал вразливості закінчиться до того, як надійде хоча б ще один пакет, і радіоканал перейде в стан безконфліктної передачі пакета $\{2\}$.

- з імовірністю $\lambda \Delta t$ надійде новий пакет із вхідного потоку, відбудеться конфлікт, і обидва пакети перейдуть до числа відкладених передач. Отже, в момент часу $1 + \Delta t$ радіоканал перебуватиме в стані $\{3\}$.

- з імовірністю $1 - \left(\frac{1}{a} + \lambda\right) \Delta t$ стан радіоканалу не зміниться.

3. Якщо радіоканал перебуває в стані $\{2\}$, тобто здійснюється безконфліктна передача пакета, то:

- з імовірністю $\frac{\Delta t}{T}$ передача пакета завершиться, і радіоканал перейде в стан $\{0\}$.

– з імовірністю $1 - \frac{\Delta t}{T}$ стан радіоканалу не зміниться. Нові пакети, які надійдуть з джерела надходження за наявності сигналу несучої, відкладуть передачу і не змінять стан радіоканалу.

4. Якщо радіоканал перебуває в стані {3}, тобто здійснюється конфліктна передача пакетів, то:

– з імовірністю $\frac{\Delta t}{T}$ паралельна (конфліктна) передача пакетів завершиться, і радіоканал перейде в стан {0}.

– з імовірністю $1 - \left(\frac{1}{T} + \lambda\right) \Delta t$ стан радіоканалу не зміниться. Нові пакети за наявності сигналу несучої відкладуть передачу і не змінять стан радіоканалу.

У табл. 2 наведені стани радіоканалу для гнучкого протоколу МДКН та ймовірності переходів між ними, причому перехід здійснюється в напрямку від стану, що вказаний у крайньому лівому стовпчику таблиці, до стану, що вказаний у верхньому рядку таблиці.

Таблиця 2. Ймовірності переходів станів радіоканалу

P_n	P_0	P_1	P_2	P_3
P_0	$1 - \lambda \Delta t$	$\lambda \Delta t$	–	–
P_1	–	$1 - \left(\frac{1}{a} + \lambda\right) \Delta t$	$\frac{\Delta t}{a}$	$\lambda \Delta t$
P_2	$\frac{\Delta t}{T}$	–	$1 - \frac{\Delta t}{T}$	–
P_3	$\frac{\Delta t}{T}$	–	–	$1 - \left(\frac{1}{T} + \lambda\right) \Delta t$

З табл. 2 можна записати систему кінцево-різницевих рівнянь для ймовірності станів радіоканалу:

$$P_0(t + \Delta t) = (1 - \lambda \Delta t) P_0(t) + \frac{1}{T} \Delta t P_2(t) + \frac{1}{T} \Delta t P_3(t),$$

$$P_1(t + \Delta t) = \left(1 - \left(\frac{1}{a} + \lambda\right) \Delta t\right) P_1(t) + \lambda \Delta t P_0(t),$$

$$P_2(t + \Delta t) = \left(1 - \frac{\Delta t}{T}\right) P_2(t) + \frac{1}{a} \Delta t P_1(t),$$

$$P_3(t + \Delta t) = \left(1 - \frac{\Delta t}{T}\right) P_3(t) + \lambda \Delta t P_1(t).$$

Після здійснення нескладних перетворень і переходу до $\Delta t \rightarrow 0$ отримуємо систему лінійних диференціальних рівнянь, що задовольняє розподіл імовірностей станів радіоканалу:

$$\frac{\partial P_0(t)}{\partial t} = -\lambda P_0(t) + \frac{1}{T} P_2(t) + \frac{1}{T} P_3(t),$$

$$\frac{\partial P_1(t)}{\partial t} = -\left(\frac{1}{a} + \lambda\right) P_1(t) + \lambda P_0(t),$$

$$\frac{\partial P_2(t)}{\partial t} = -\frac{1}{T} P_2(t) + \frac{1}{a} P_1(t),$$

$$\frac{\partial P_3(t)}{\partial t} = -\frac{1}{T} P_3(t) + \lambda P_1(t).$$

З умови стаціонарності з цієї системи рівнянь легко отримати систему лінійних алгебричних рівнянь, що зв'язує між собою ймовірності станів радіоканалу:

$$\lambda P_0 = \frac{1}{T} P_2 + \frac{1}{T} P_3,$$

$$\lambda P_0 = \left(\frac{1}{a} + \lambda\right) P_1,$$

$$\frac{1}{T} P_2 = \frac{1}{a} P_1,$$

$$\frac{1}{T} P_3 = \lambda P_1.$$

Ця система рівнянь з урахуванням нормування $\sum_{i=0}^3 P_i(t) = 1$ дає змогу знайти ймовірності станів радіоканалу, в т.ч. і ймовірність перебування радіоканалу в стані безконфліктної передачі:

$$P_M = P_2 = \frac{\lambda T}{1 + 2a\lambda + \lambda T + aT\lambda^2}. \quad (4)$$

На рис. 4 показана залежність $P_M(\lambda)$ при $p = 10^{-5}$ для довжин пакетів: оптимальної (крива 1), збільшеної в 10 разів (крива 2) і зменшеної в 10 разів (крива 3), обчислених для розміру мережі, рівної 30 км, що дає значення $a = 10^{-5}$, фізичної швидкості передачі $V = 10^6$ біт/сек і довжини службової частини пакета $C = 50$. З цього графіка видно, що в межах стійкості роботи протоколу ймовірність успішної передачі збільшується (зменшується) зі збільшенням (зменшенням) довжини пакетів. Для кожної довжини пакета існує значення інтенсивності трафіку $\lambda_{\max} = \sqrt{\frac{1}{aT}}$ (межа стійкості), за якого ймовірність його успішної передачі максимальна. Значення λ_{\max} отримано з рівняння

$$\frac{dP_2}{d\lambda} = -a(T\lambda)^2 + T = 0.$$

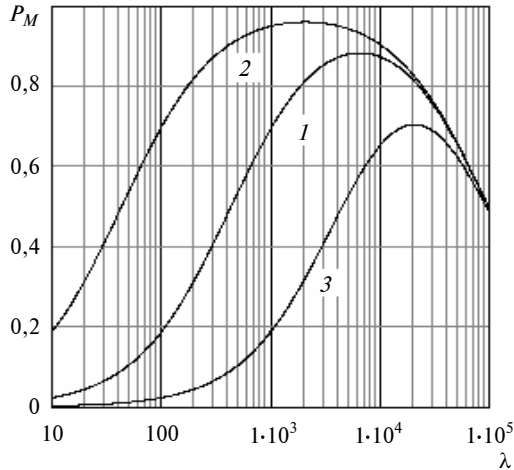


Рис. 4. Залежність імовірності успішної передачі пакета від інтенсивності трафіку: 1 – оптимальна довжина пакета, 2 – збільшена в 10 разів, 3 – зменшена в 10 разів

З урахуванням (1), (3) і (4) рівняння ефективної швидкості передачі має вигляд

$$C = \frac{V\lambda T}{1 + 2a\lambda + \lambda T + aT\lambda^2} \times \frac{[rn_o + (r - 1)c](1 - p)^{r(n_o+c)}}{r(n_o + c)}.$$

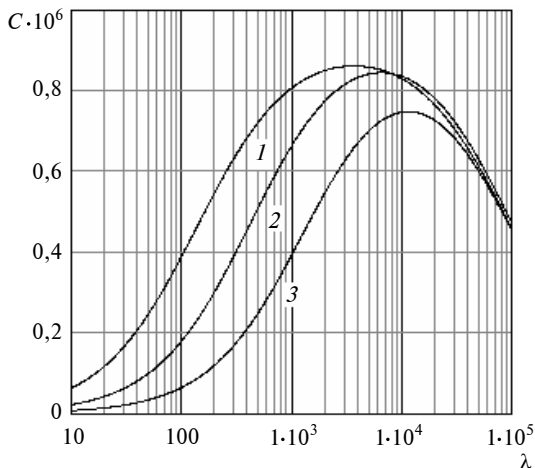


Рис. 5. Ефективна швидкість передачі $C(\lambda)$ при зміні p : 1 – $p = 10^{-6}$; 2 – $p = 10^{-5}$; 3 – $p = 10^{-4}$

На рис. 5 показана залежність $C(\lambda)$ для оптимальних значень довжини інформаційної

частини пакетів за різних інтенсивностей помилок в радіоканалі.

На рис. 6. показана залежність $C(\lambda)$ при $p = 10^{-5}$ для оптимальної довжини пакета (крива 1), збільшеної та зменшеної довжини інформаційної частини пакета в 10 разів (відповідно криві 2 і 3).

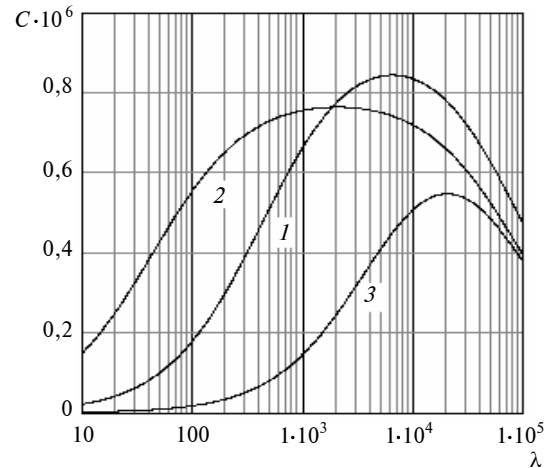


Рис. 6. Ефективна швидкість передачі при зміні довжини пакетів: 1 – оптимальна довжина пакета; 2 – інформаційна частини пакета, збільшена в 10 разів; 3 – інформаційна частини пакета, зменшена в 10 разів

Збільшення довжини пакетів дає можливість отримати істотний вигравш у ефективній швидкості передачі в межах стійкості роботи. Наприклад, з рис. 6 випливає, що при $\lambda = 100$ збільшення довжини пакета в 10 разів відносно оптимальної довжини підвищує ефективну швидкість приблизно в 3 рази, але при цьому зменшується межа стійкості. Зменшення довжини пакетів істотно знижує ефективну швидкість передачі.

Висновки

Запропонована математична модель може бути використана в адаптивних LLC- і MAC-протоколах пакетних радіомереж для розрахунку оптимального значення довжини пакетів даних з урахуванням комплексного впливу фізичного і каналного рівнів мережі при конкурентному доступі до радіоканалу, а також для обчислення ефективної швидкості передачі даних для кожного набору значень системних параметрів.

Стратегія адаптивного керування для гнучкого протоколу МДКН на MAC-рівні має бути основана виключно на процедурах збільшення довжини пакетів відносно оптимального значення для LLC-протоколу.

Подальші дослідження будуть проведені для MAC-протоколів з іншими стратегіями адаптивного керування.

1. Чернега В.С., Глатц Э., Виниченко С.А. Оценка потенциальной эффективной скорости передачи данных на транспортном уровне с сетях 802.11b // Вісник СевНТУ. Сер. Інформатика, електроніка, зв'язок. – 2012. – Вип. 131. – С. 32–36.
2. Кулик А.Я. Визначення параметрів передаванні інформації в розподілених комп'ютерних системах // Вісник Хмельницького нац. ун-ту. – 2010. – № 5. – С. 212–215.
3. Гуляев К.Д., Каптур В.А., Тихонов В.І. Принципи організації адаптивної взаємодії відкритих систем // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 2012. – № 2. – С. 7–15.
4. V.T. Raisinghani and S. Iyer, "Cross-layer design optimizations in wireless protocol stacks", Computer Comm., vol. 27, pp. 720–724, 2004.
5. Самоорганизующиеся радиосети со сверхширокополосными сигналами / С.Г. Бунин, А.П. Войтер, М.Е. Ильченко, В.А. Романюк. – К.: Наук. думка, 2012. – 444 с.
6. Назаров А.А., Цой С.А. Общий подход к исследованию марковских моделей сетей передачи данных, управляемых статическими протоколами случайного множественного доступа // Автоматика и вычислительная техника. – 2004. – № 4. – С. 73–85.

Рекомендована Радою
Інституту телекомунікаційних систем
НТУУ "КПІ"

Надійшла до редакції
30 квітня 2013 року