

<https://doi.org/10.15407/csc.2024.01.018>
УДК 621.39

А.П. ВОЙТЕР, доктор технічних наук, старший науковий співробітник,
заступник директора, Інститут ядерних досліджень НАН України
03028, м. Київ, просп. Науки, 47, Україна,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4693-1364>,
voiter@kinr.kiev.ua

ЕФЕКТИВНІСТЬ АДАПТИВНИХ ПРОТОКОЛІВ МНОЖИННОГО ДОСТУПУ ПАКЕТНИХ РАДІОМЕРЕЖ В УМОВАХ САМОПОДІБНОГО ТРАФІКУ

Запропоновано математичну модель роботи адаптивних протоколів множинного доступу пакетних радіомереж в умовах самоподібного трафіку, отримано рівняння середньої швидкості передачі та здійснено порівняльний аналіз з результатами досліджень цих же протоколів для трафіку з розподілом Пуассона.

Ключові слова: адаптивні протоколи CSMA, самоподібний трафік, розподіл Парето, математична модель, швидкість передачі, довжина пакетів, ефективність управління.

Вступ

Запорукою забезпечення належної якості обслуговування в сучасних мультисервісних мережах телекомунікацій є точність прогнозування поведінки трафіку. Донедавна теоретичною базою для проектування мереж була теорія телетрафіку, але експериментальні дослідження й аналіз численних вимірів інформаційних потоків на пакетному рівні виявили, що природа процесів у мережах виходить за межі відомих класичних моделей [1, 3]. Зокрема, було виявлено властивості самоподібності трафіку, які зберігають післядію та мають схильність до високої пульсації інтенсивності трафіку на різних випадкових інтервалах часу. Такі пульсації є особливо критичними для радіомереж з пакетною комутацією з протоколами доступу до спільного радіоканалу *Carrier Sense Multiple*

Access (CSMA) [4], відмінною рисою яких є наявність межі стійкості їхньої роботи, за якою при подальшому зростанні інтенсивності трафіку різко зростає кількість конфліктів та, відповідно, знижується пропускна здатність мережі. В базових протоколах CSMA не було передбачено процедур адаптації до інтенсивності трафіку. Натомість такі процедури є в синхронних адаптивних протоколах CSMA зі змінною довжиною пакетів [5, 6]. Ці протоколи засновані на гнучкому й жорсткому базових протоколах CSMA, які доповнені процедурами зміни довжини пакетів залежно від інтенсивності трафіку. В адаптивних протоколах абоненти мають розрізняти не два, як у протоколах CSMA, а три стани радіоканалу:

- зайнятий стан, коли в мережі є сигнал радіовипромінювання;

Цитування: Войтер А.П. Ефективність адаптивних протоколів множинного доступу пакетних радіомереж в умовах самоподібного трафіку. *Control Systems and Computers*, 2024, 1, 18—26. <https://doi.org/10.15407/csc.2024.01.018>

© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2024. Стаття опублікована на умовах відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

■ стан дозволу передачі (сигналу радіовипромінювання немає протягом часу не більше ніж максимальний час поширення радіосигналу в мережі);

■ вільний стан (сигнал радіовипромінювання відсутній протягом часу, більшого за максимальний час поширення радіосигналу в мережі).

Якщо радіоканал зайнятий, то процедури адаптивних протоколів є аналогічними із процедурами відповідних жорсткого та гнучкого протоколів CSMA.

В інших двох станах абоненти мають діяти відповідно до однієї з трьох стратегій:

■ за першою стратегією у стані дозволу передачі абонент має передати пакет встановленого (стандартного) розміру, а у вільному стані — пакет більшої довжини;

■ за другою стратегією у стані дозволу передачі абонент має передати пакет меншої довжини, а у вільному стані — пакет встановленого (стандартного) розміру;

■ за третьою стратегією у стані дозволу передачі абонент має передати пакет меншої довжини, а у вільному стані — пакет більшої довжини.

Постановка задачі

Адаптивні протоколи CSMA досліджено для моделі трафіку з розподілом Пуассона. При цьому було використано одне з положень теорії відновлення, коли розглядається випадковий процес переходу радіоканалу з вільного стану в зайнятий стан чи навпаки.

Узагальнену часову діаграму роботи радіоканалу для цих протоколів представлено на рис. 1, де стрілками показано моменти надходження пакетів для передачі, а τ — тривалість одного такту роботи радіоканалу. Очевидно, що радіоканал може перебувати в одному із двох можливих станів — зайнятому середньої тривалості B_{ij} , коли в радіоканалі здійснюється передача і присутній сигнал радіовипромінювання, та вільному I , коли передачу дозволено і який включає також і стан дозволу передачі. Зайнятий стан являє собою послідовність передач випадкової кількості пакетів, розділених інтервалом тривалості одного так-

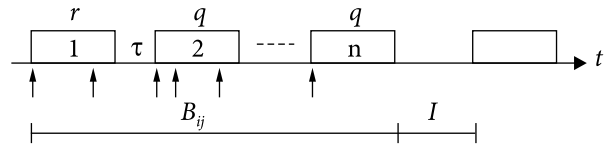


Рис.1. Узагальнена часова діаграма роботи радіоканалу

ту роботи радіоканалу τ . Перша передача пакета в зайнятому стані буде мати нормовану тривалість r , всі наступні — q , де $\{r > 1, q = 1\}$ для першої стратегії, $\{r = 1, q < 1\}$ для другої стратегії, $\{r > 1, q < 1\}$ для третьої стратегії.

Зайнятий стан може відображати дві події: безконфліктну (успішну) передачу пакета даних, і одночасну передачу декількох пакетів даних, результатом якої є втрата конфліктних пакетів і непродуктивне використання часу роботи радіоканалу. Інтервал часу перебування радіоканалу в стані безконфліктної передачі пакетів даних ототожнюється з корисним використанням радіоканалу. Зайнятий і вільний стан радіоканалу чергуються, утворюючи цикли відновлення. Середню швидкість передачі для j -ї стратегії визначимо як відношення середньої тривалості корисного інтервалу U_{ij} до тривалості циклу відновлення (суми середньої тривалості зайнятого B_{ij} і вільного I станів):

$$S_{ij} = \frac{U_{ij}}{B_{ij} + I}, \quad (1)$$

де $i = 1$ для жорсткого, а де $i = 2$ для гнучкого варіантів протоколу $j = \{1, 2, 3\}$ відповідно до однієї із трьох стратегій.

В [7] запропоновано математичну модель роботи базових синхронних протоколів CSMA в умовах самоподібного трафіку, отримано рівняння середньої швидкості передачі та здійснено порівняльний аналіз з результатами досліджень цих же протоколів для трафіку з розподілом Пуассона. Доведено, що самоподібний трафік суттєво впливає на межу стійкості протоколів CSMA та їхню пропускну здатність, що має бути враховано при використанні цих протоколів в радіомережах з довгостроковою залежністю в розподілі трафіку. При цьому спостерігається незначне зниження макси-

мальної середньої швидкості передачі протоколів CSMA порівняно з моделлю трафіку з розподілом Пуассона.

Метою даної статті є побудова математичної моделі роботи адаптивних синхронних протоколів CSMA в умовах самоподібного трафіку для трьох вказаних стратегій, отримання рівнянь середньої швидкості передачі та їх порівняльний аналіз з результатами досліджень цих же протоколів для трафіку з розподілом Пуассона.

Як і в [7] для характеристики процесу надходження пакетів на передачу використовуємо розподіл Парето другого типу:

$$P = Pr \text{ [інтервал між передачами } < t] \left(\frac{t+k}{k} \right)^{-\alpha}, \quad (2)$$

де α — параметр форми розподілу, k — локальний параметр, і обидва є додатними дійсними числами. Для розподілу Парето середній інтервал між передачами визначається як $\bar{t} = k/(\alpha - 1)$, $\alpha > 1$. Отже, інтенсивність трафіку: $G = T/\bar{t} = (\alpha - 1)T/k$. Звідси, тривалість передачі одного пакета даних: $T = Gk/(\alpha - 1)$. З умови $T = 1$ отримаємо: $k = (\alpha - 1)/G$.

Тоді рівняння (2) матиме вигляд:

$$P = \left(\frac{tG + \alpha - 1}{\alpha - 1} \right)^{-\alpha}. \quad (3)$$

Математична модель

Отримаємо рівняння середньої швидкості передачі для синхронного жорсткого адаптивного протоколу CSMA при самоподібному трафіку з розподілом (3).

Зайнятий стан являє собою послідовність передач випадкової кількості пакетів, розділених нормованим інтервалом тривалістю τ .

Враховуючи, що перша передача пакета в періоді зайнятості буде мати тривалість r , а всі наступні — q , середня кількість передач у зайнятому стані за j -стратегією дорівнює:

$$n_{1j} = P_r + 2(1 - P_r)P_q + \sum_{i=3}^{\infty} i(1 - P_r)(1 - P_q)^{(i-2)}P_q =$$

$$= P_r + 2(1 - P_r)P_q + \frac{P_q(1 - P_r)((P_q)^{-2} + 2P_q - 3)}{1 - P_q},$$

де відповідно до (3):

$$P_r = \left(\frac{(r + \tau)G + \alpha - 1}{\alpha - 1} \right)^{-\alpha},$$

$$P_q = \left(\frac{(q + \tau)G + \alpha - 1}{\alpha - 1} \right)^{-\alpha}.$$

Тоді середня тривалість зайнятого стану радіоканалу:

$$B_{1j} = r + \tau + (n_{1j} - 1)(q + r) = r - q + n_{1j}(q + \tau).$$

Очевидно, що кількість тактів у вільному стані і для жорсткого, і для гнучкого протоколів незалежно від стратегії розподілена геометрично з середнім значенням $(1 - P_\tau)^{-1}$, де

$$P_\tau = \left(\frac{\tau G + \alpha - 1}{\alpha - 1} \right)^{-\alpha}.$$

Отже середня тривалість вільного стану радіоканалу

$$I = \frac{\tau}{1 - P_\tau}. \quad (4)$$

Ймовірність успішної передачі першого пакета в зайнятому стані U_{11j} дорівнює ймовірності відсутності надходження інших пакетів за останній інтервал вільного стану τ , ймовірність успішної передачі другого U_{12j} — ймовірності відсутності надходження інших пакетів за інтервал $r + \tau$, а ймовірність успішної передачі наступних пакетів U_{1nj} — ймовірності відсутності надходження інших пакетів за інтервал $q + \tau$. В [7] отримано формулу для ймовірності успішної передачі для заданого інтервалу вразливості. Використовуючи цю формулу можна записати:

$$Q_{11j} = \int_0^\tau \frac{1}{\tau} \left(\frac{tG + \alpha - 1}{\alpha - 1} \right)^{-\alpha} \left(\frac{(\tau - t)G + \alpha - 1}{\alpha - 1} \right)^{-\alpha} dt,$$

$$Q_{12j} = \int_0^{r+\tau} \frac{1}{r + \tau} \left(\frac{tG + \alpha - 1}{\alpha - 1} \right)^{-\alpha} \times$$

$$\times \left(\frac{(r + \tau - t)G + \alpha - 1}{\alpha - 1} \right)^{-\alpha} dt,$$

$$Q_{1nj} = \int_0^{q+\tau} \frac{1}{q + \tau} \left(\frac{tG + \alpha - 1}{\alpha - 1} \right)^{-\alpha} \times$$

$$\times \left(\frac{(q + \tau - t)G + \alpha - 1}{\alpha - 1} \right)^{-\alpha} dt.$$

Тоді середня тривалість корисного інтервалу:

$$U_{1j} = rQ_{11j} + qQ_{12j} + q(n_{1j} - 2)Q_{1nj}.$$

Підставляючи значення B_{1j} , U_{1j} та I в (1) одержимо рівняння середньої швидкості передачі S_{1j} для синхронного адаптивного жорсткого протоколу із заданими стратегіями зміни довжини пакетів.

$$S_{1j} = \frac{(1 - P_\tau)\{rQ_{11j} + q[Q_{12j} + (n_{1j} - 2)Q_{1nj}]\}}{(1 - P_\tau)[r - q + n_{1j}(q + \tau)] + \tau}.$$

При $r = q = 1$ рівняння (5) буде тотожним рівнянню середньої швидкості класичного жорсткого синхронного протоколу CSMA в умовах самоподібного трафіку [7].

Отримаємо рівняння середньої швидкості передачі для синхронного гнучкого адаптивного протоколу CSMA при самоподібному трафіку з розподілом (3). Інтервал вразливості для гнучких протоколів не залежить від тривалості попередньої передачі, а визначається лише часом розповсюдження радіосигналу в мережі, тобто величиною τ . Тоді незалежно від стратегії кількість передач у зайнятому стані є випадковою величиною з геометричним розподілом і середнім значенням $n_2 = P_\tau^{-1}$. Тоді, з огляду на те, що тривалість першої передачі в зайнятому стані дорівнює $r + \tau$, а кожна з наступних — $q + \tau$, одержимо рівняння середньої тривалості зайнятого стану:

$$B_{2j} = r - q + n_2(q + \tau).$$

Ймовірність успішної передачі для гнучкого протоколу також визначається лише часом τ . Отже ймовірність успішної передачі незалежно від заданої стратегії буде визначатися рівнянням:

$$Q_2 = \int_0^\tau \frac{1}{\tau} \left(\frac{tG + \alpha - 1}{\alpha - 1} \right)^{-\alpha} \left(\frac{(\tau - t)G + \alpha - 1}{\alpha - 1} \right)^{-\alpha} dt.$$

Тоді середня тривалість корисного інтервалу:

$$U_{2j} = Q_2[r + (n_2 - 1)q].$$

Підставляючи значення B_{2j} (4) і U_{2j} в (1) одержимо рівняння середньої швидкості передачі для синхронних адаптивних гнучких протоколів із заданими стратегіями зміни довжини пакетів:

$$S_{2j} = \frac{(1 - P_\tau)\{Q_2[r + (n_2 - 1)q]\}}{(1 - P_\tau)[r - q + n_2(q + \tau)] + \tau}. \quad (6)$$

При $r = q = 1$ рівняння (6) буде тотожним рівнянню середньої швидкості класичного гнучкого синхронного протоколу CSMA в умовах самоподібного трафіку [7].

Аналіз результатів

При аналізі ефективності протоколів в умовах самоподібного трафіку буде також здійснюватися порівняння їхніх характеристик з відповідними характеристиками цих же протоколів в умовах трафіку з розподілом Пуассона (базовими протоколами).

На рис. 2 і 3 представлено графіки залежності середньої швидкості передачі S_{1j} та S_{2j} із заданими стратегіями зміни довжини пакетів, побудовані за рівняннями (5) та (6). Там же представлені для порівняння аналогічні графіки S'_{p1j} та S'_{p2j} базових протоколів, виконані за формулами, які містяться в [5, 6]. Для кожної із трьох стратегій розрахунки було зроблено при $\tau = 0,01$, $\alpha = 1,5$ для чотирьох комбінацій значень довжини пакетів даних: для першої стратегії: 1 — $\{r = 1, q = 1\}$, 2 — $\{r = 3, q = 1\}$, 3 — $\{r = 5, q = 1\}$ та 4 — $\{r = 10, q = 1\}$; для другої стратегії: 1 — $\{r = 1, q = 1\}$, 2 — $\{r = 1, q = 0,8\}$, 3 — $\{r = 1, q = 0,5\}$ та 4 — $\{r = 1, q = 0,1\}$; для третьої стратегії: 1 — $\{r = 1, q = 1\}$, 2 — $\{r = 3, q = 0,8\}$, 3 — $\{r = 5, q = 0,5\}$, та 4 — $\{r = 10, q = 0,1\}$. Номерами цих комбінацій позначено відповідні криві на графіках відповідних стратегій. При-

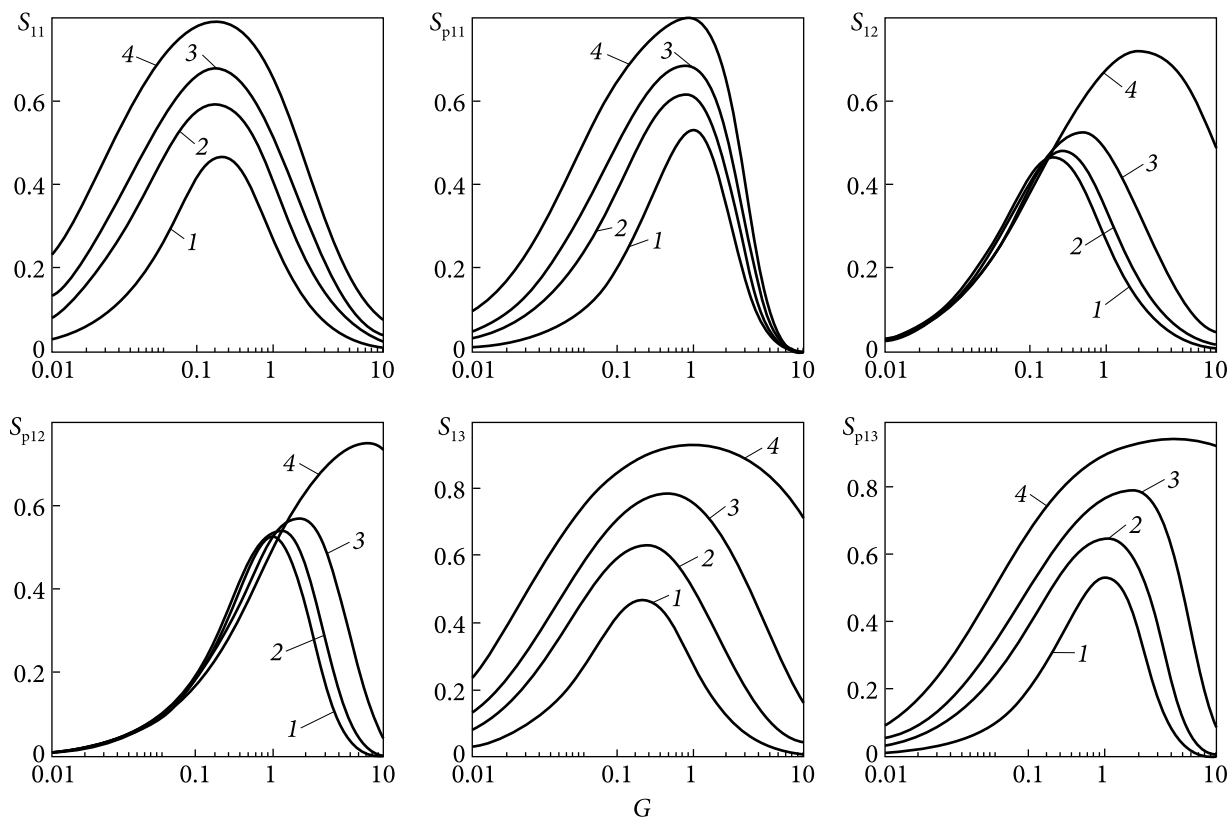


Рис.2. Середня швидкість передачі для синхронного адаптивного жорсткого протоколу

Табл. 1. Пропускна здатність і межа стійкості синхронного адаптивного жорсткого протоколу

Стратегія	Комбінація $\{r, q\}$	Розподіл Парето		Розподіл Пуассона		Порівняння	
		$S_{1j\max}$	$G_{1j\max}$	$S_{p1j\max}$	$G_{p12j\max}$	$\frac{S_{p1j\max}}{S_{1j\max}}$	$\frac{G_{p1j\max}}{G_{1j\max}}$
1	1	0,468	0,25	0,531	1,0	1,14	4,0
	2	0,595	0,2	0,617	0,9	1,04	4,5
	3	0,681	0,2	0,688	0,9	1,01	4,5
	4	0,793	0,2	0,797	0,9	1,01	4,5
2	1	0,468	0,25	0,531	1,0	1,14	4,0
	2	0,482	0,3	0,540	1,1	1,12	3,7
	3	0,526	0,5	0,569	1,8	1,08	3,6
	4	0,722	2,0	0,748	7,0	1,03	3,5
3	1	0,468	0,25	0,531	1,0	1,14	4
	2	0,629	0,3	0,644	1,1	1,02	3,7
	3	0,783	0,5	0,791	1,8	1,01	3,6
	4	0,931	1,0	0,943	4,0	1,01	4,0

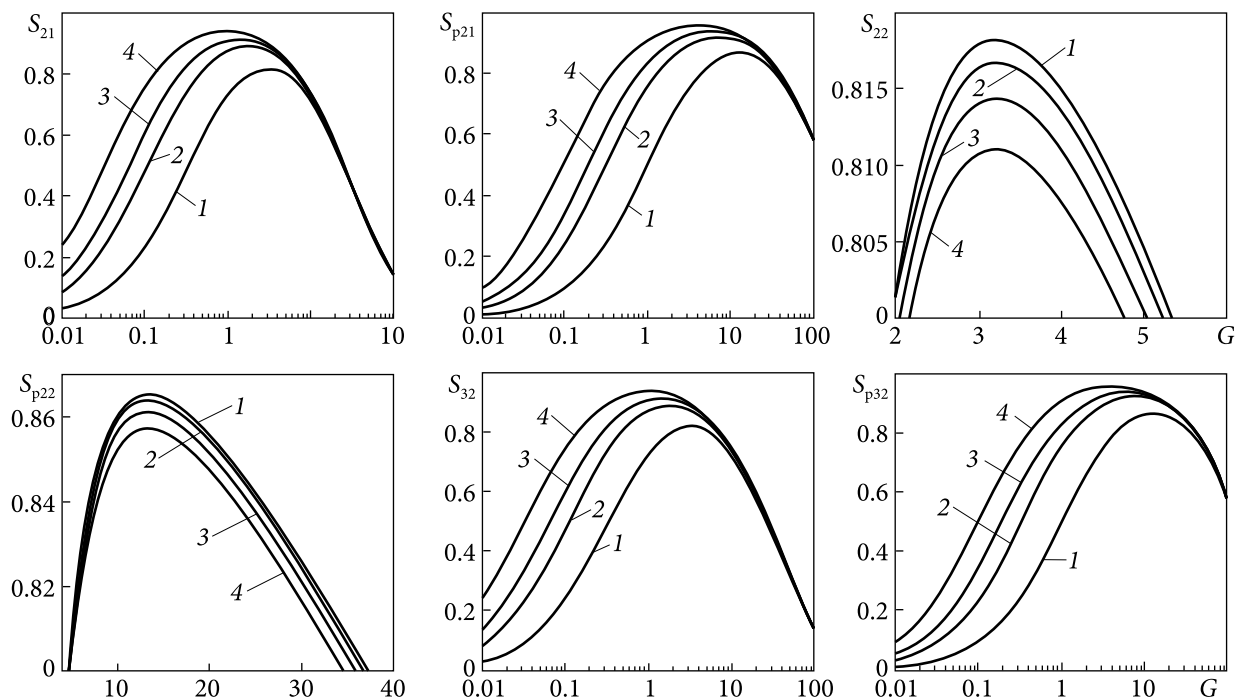


Рис. 3. Середня швидкість передачі для синхронного адаптивного гнучкого протоколу

Табл. 2. Пропускна здатність і межа стійкості синхронного адаптивного гнучкого протоколу

Стратегія	Комбінація $\{r, q\}$	Розподіл Парето		Розподіл Пуассона		Порівняння	
		$S_{2j\max}$	$G_{2j\max}$	$S_{p2j\max}$	$G_{p2j\max}$	$\frac{S_{p2j\max}}{S_{2j\max}}$	$\frac{G_{p2j\max}}{G_{2j\max}}$
1	1	0,818	3,2	0,865	14,0	1,06	4,4
	2	0,889	2,0	0,919	8,0	1,03	4,0
	3	0,913	1,5	0,937	6,0	1,02	4,0
	4	0,938	1,0	0,955	4,0	1,02	4,0
2	1	0,818	3,2	0,865	14,0	1,06	4,4
	2	0,817	3,2	0,864	12,8	1,06	4,0
	3	0,814	3,2	0,861	12,8	1,06	4,0
	4	0,811	3,2	0,857	12,8	1,06	4,0
3	1	0,818	3,2	0,865	14,0	1,06	4,4
	2	0,889	2,0	0,919	8,0	1,03	4,0
	3	0,913	1,5	0,937	6,0	1,03	4,0
	4	0,938	1,0	0,955	4,0	1,02	4,0

чому крива, побудована з першою комбінацією в кожній стратегії, очевидно є середньою швидкістю передачі відповідного класичного протоколу CSMA і наведена для порівняння з адаптивними протоколами.

Табл. 1 містить кількісні показники пропускної здатності (максимального значення середньої швидкості передачі $S_{p1j\max}$) і межі стійкості (значення трафіку $G_{p1j\max}$, при якому середня швидкість передачі сягає максимального

значення) синхронного адаптивного жорсткого протоколу, розраховані за формулою (5). Там же для порівняння наведено такі ж показники S_{p1jmax} і G_{p1jmax} базового протоколу.

Для всіх трьох стратегій в умовах самоподібного трафіку спостерігається суттєве (від 3,5 до 4,5 разів) зниження межі стійкості роботи протоколу, внаслідок чого вони забезпечують більшу середню швидкість передачі при нижчій інтенсивності трафіку ніж базовий протокол.

Пропускна здатність протоколу для першої стратегії зі збільшенням r при практично незмінній межі стійкості має нижчу динаміку зростання і при $r = 10$ сягає паритетного значення з базовим протоколом. Що стосується відносного збільшення пропускної здатності порівняно з класичним протоколом CSMA, то перша стратегія забезпечує зростання на 69 %, а базовий протокол — лише на 50 %.

За другою стратегією зі зменшенням q спостерігається, як і в базовому протоколі, зростання межі стійкості зі збереженням співвідношення між ними. При цьому пропускна здатність зростає, залишаючись у підсумку меншою лише в 1,03 рази за порівнювану. При цьому відносно пропускної здатності класичного протоколу CSMA друга стратегія забезпечує зростання пропускної здатності на 54 %, а базовий протокол — лише на 41 %.

Третя стратегія при зростанні r й одночасному зменшенні q демонструє також пропорційне з базовим зростання межі стійкості протоколу та зростання пропускної здатності до рівня, який майже збігається з порівнюваним, причому її відносне збільшення сягає 98 % порівняно з 78 % базового протоколу.

Табл. 2 містить кількісні показники пропускної здатності (максимального значення середньої швидкості передачі S_{2jmax}) та межі стійкості (значення трафіку G_{2jmax} , при якому середня швидкість передачі сягає максимального значення) синхронного адаптивного жорсткого протоколу, розраховані за формулою (6). Там же для порівняння наведено такі ж показники S_{p2jmax} і G_{p2jmax} базового протоколу.

Для всіх трьох стратегій гнучкого адаптивного протоколу, як і для жорсткого в умовах

самоподібного трафіку, також спостерігається суттєве (від 4,0 до 4,4 разів) зниження межі стійкості роботи протоколу, внаслідок чого вони забезпечують більшу ніж базовий протокол середню швидкість передачі при нижчій інтенсивності трафіку.

Пропускна здатність протоколу для першої стратегії зі збільшенням r зростає при одночасному зменшенні межі стійкості та при $r = 10$ стає рівнозначним із базовим протоколом, причому її відносне збільшення сягає 15 % порівняно з 10 % базового протоколу.

Друга стратегія при зменшенні q практично не впливає на пропускну здатність та межу стійкості й адаптивне керування за цією стратегією не має сенсу.

Оскільки третя стратегія є по суті об'єднанням першої та другої, то вона практично рівнозначна першій стратегії.

Висновки

Запропонована математична модель адаптивних протоколів CSMA дає можливість розраховувати значення середньої швидкості, межі стійкості та пропускної здатності цих протоколів в умовах самоподібного трафіку для заданого набору параметрів та стратегій зміни довжини пакетів даних.

Для кожного значення інтенсивності трафіку можуть бути розраховані оптимальні комбінації довжини пакетів, які забезпечуватимуть максимальну швидкість передачі та адаптацію до поточного трафіку в мережі.

Друга стратегія для гнучкого адаптивного протоколу CSMA, як і за моделлю розподілу Пуассона, є неефективною та не може бути використана для адаптивного управління середньою швидкістю передачі та межею стійкості.

Самоподібний трафік суттєво зменшує межу стійкості адаптивних протоколів CSMA порівняно з розрахунками за моделлю розподілу Пуассона, що має бути враховано при використанні цих протоколів у радіомережах із довгостроковою залежністю в розподілі трафіку для запобігання неконтрольованого зростання кількості конфліктів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Карпухин А.В., Кириченко Л.О., Радивилова Т.А. Самоподобие в информационных системах. *Прикладная радиоэлектроника*, 2008. Т. 7, №1. С. 54—64.
2. Агеев Д.В., Игнатенко А.А., Копылев А.Н. Методика определения параметров потоков на разных участках мультисервисной телекоммуникационной сети с учетом эффекта самоподобия. *Проблемы телекоммуникаций*. 2011. №3 (5). С. 18—37.
3. Крылов В.В., Самохвалов С.С. Теория телетрафика и ее приложения. СПб.: “БХВ-Петербург”, 2005, 288 с.
4. Ильченко М.Е., Бунин С.Г., Войтер А.П. Сотовые радиосети с коммутацией пакетов. К.: Наукова думка, 2003, 266 с.
5. Бунін С.Г., Войтер А.П. Адаптивні протоколи множинного доступу зі змінною довжиною пакетів. *Наукові вісті НТУУ “КПІ”*, 2007, № 5. С. 25—29.
6. Войтер А.П. Порівняльний аналіз стратегій адаптації довжини пакетів при конкурентному доступі до радіоканалу. *Наукові вісті НТУУ “КПІ”*, 2007, № 6. С.11—15.
7. Войтер А.П. Аналіз впливу самоподібного трафіку на ефективність протоколів множинного доступу. *Control Systems and Computers*, 2023, №1, pp. 73—79.

Надійшла 16.01.2024

REFERENCES

1. Karpukhin, A.V., Kirichenko, L.O., Radivilova, T.A. (2008). “Self-similarity in information systems”. *Applied radioelectronics*, 7 (1), pp.54—64 (In Russian).
2. Ageev, D.V., Ignatenko, A.A., Kopylev, A.N. (2011). “A technique for determining flow parameters in different sections of a multiservice telecommunication network, taking into account the effect of self-similarity”. *Problems of telecommunications*. No. 3(5), pp. 18—37 (In Russian).
3. Krylov, V.V., Samokhvalov, S.S. (2005). The theory of teletraffic and its applications. St. Petersburg: “BHV-Petersburg”, 288 p. (In Russian).
4. Ilchenko, M.E., Bunin, S.G., Voiter, A.P., Romanyuk V.A. (2012). Self-organizing radio networks with ultra-wideband signals. K.: Naukova Dumka. 444 p. (In Russian).
5. Bunin, S.G., Voiter, A.P. (2007). Adaptive multiple access protocols with variable packet length. *Scientific news of the National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute”*, No 5, pp. 25—29 (In Ukrainian).
6. Voiter, A.P. (2007). “Comparative analysis of packet length adaptation strategies for competitive access to a radio channel”. *Scientific news of the National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»*. No 6, pp. 11—15 (In Ukrainian).
7. Voiter, A.P. (2023). “Analysis of the impact of self-similar traffic on protocol efficiency multiple access”. *Control Systems and Computers*. No 1, pp. 73—79, <https://doi.org/10.15407/csc.2023.01.073> (In Ukrainian).

Received 16.01.2024

A.P. Voiter, Doctor (Eng.), Senior Scientist, Deputy Director,
Institute of Nuclear Research of the National Academy of Sciences of Ukraine,
47, Nauki Avenue, Kyiv, 03028, Ukraine,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4693-1364>,
voiter@kinr.kiev.ua

EFFICIENCY OF ADAPTIVE MULTIPLE ACCESS PROTOCOLS OF PACKET RADIO NETWORKS UNDER SELF-SIMILAR TRAFFIC CONDITIONS

Introduction. Self-similar traffic in modern telecommunication radio networks requires new methods for calculating parameters of adaptive Carrier Sense Multiple Access (CSMA) protocols, which are different from those adopted in classical teletraffic theory based on Poisson distribution models.

Purpose. Construction of a mathematical model of the operation of adaptive synchronous CSMA protocols in conditions of self-generating traffic for three strategies: changing the length of data packets, obtaining the equations for the average transmission rate and comparing the effectiveness of adaptive control with the results of studies of the same protocols for traffic with a Poisson distribution.

Methods. This goal is achieved by creating and analyzing a mathematical model of the operation of the flexible and rigid synchronous adaptive CSMA protocol for three strategies for changing the length of data packets under the traffic conditions with a Pareto distribution. The model is described by the average protocol transmission rate equations, which are a function of traffic intensity, Pareto distribution parameters, and strategies for changing the length of data packets.

Results. It has been proven that self-similar traffic significantly reduces the stability limit of adaptive CSMA protocols, which must be taken into account when using these protocols in radio networks with long-term dependence in traffic distribution. At the same time, the throughput of adaptive CSMA protocols remains virtually unchanged compared to the traffic model with a Poisson distribution.

Conclusions. The proposed mathematical model of adaptive CSMA protocols allows to calculate the real values of the average speed, stability limit and throughput of these protocols under the conditions of self-similar traffic for the proposed strategies for changing the length of data packets. The considered strategies (except for the second) are effective for adaptive control in the conditions of self-generating traffic, but at a significantly lower value of traffic intensity compared to the Poisson distribution.

Keywords: *adaptive CSMA protocols, self-similar traffic, Pareto distribution, mathematical model, data transfer rate, packet length, control efficiency.*