

DOI <https://doi.org/10.15407/csc.2023.01.073>
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

АНАЛІЗ ВПЛИВУ САМОПОДІБНОГО ТРАФІКУ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ПРОТОКОЛІВ МНОЖИННОГО ДОСТУПУ

Запропоновано математичну модель роботи синхронних протоколів Carrier Sense Multiple Access з гнучкою та жорсткою стратегіями 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: протоколи CSMA, самоподібний трафік, розподіл Парето, математична модель, швидкість передачі, межа стійкості, пропускна здатність.

Вступ

Сучасні дослідження трафіку, що передається в мультисервісних телекомунікаційних радіомережах, показують відмінність його статистичних характеристик від прийнятих у класичній теорії телетрафіку [1–3]. Ця відмінність полягає в наявності ознаки самоподібності, за якою використання традиційних методів розрахунку параметрів радіомережі, заснованих на моделях розподілу Пуассона, дає невиправдано оптимістичні результати, що призводить до недооцінки навантаження та стабільності роботи. Через самоподібність трафіку в мережі на різних випадкових інтервалах часу виникають пульсації навантаження, які можуть призводити до великих затримок і втрат пакетів, якщо в мережі заздалегідь не буде вжито певних заходів забезпечення якості обслуговування. Особливо критично це може проявитися в радіомережах з протоколами множинного доступу до радіоканалу, які визначають порядок

координації дій абонентів при передачі пакетів даних у спільному радіоканалі. Ці протоколи схильні до різкого збільшення конфліктів за межею стійкості, тобто рівнем трафіку, при перевищенні якого інтенсивність конфліктів починає переважати інтенсивність успішних передач.

Відома значна кількість таких протоколів [4–6], але всі вони є певною мірою модифікацією протоколів *Carrier Sense Multiple Access (CSMA)*, вперше запропонованих і досліджених у [7]. У протоколах *CSMA* визначальною процедурою є перевірка перед початком передачі зайнятості радіоканалу за наявності в ньому радіовипромінювання. Є два основних види протоколів, які відрізняються стратегією поведінки абонентів після визначення зайнятості радіоканалу: *CSMA* з гнучкою стратегією і *CSMA* з жорсткою стратегією. Кожен із них може функціонувати у вільному або синхронному варіанті. У синхронному варіанті контроль зайнятості

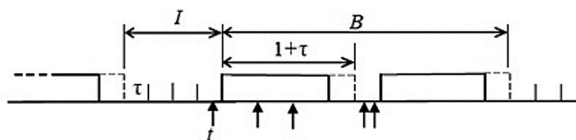


Рис. 1. Узагальнена діаграма роботи протоколів CSMA

чи передача пакетів здійснюється лише на початку тактових інтервалів. Тривалість тактів встановлюють рівною часу розповсюдження радіосигналу в мережі.

За протоколом CSMA з гнучкою стратегією перед передачею абонент має перевірити зайнятість радіоканалу і, коли він вільний, розпочати передачу пакета, а коли зайнятий — відкласти спробу передачі на інтервал часу випадкової довжини, після закінчення якого знову повторити спробу передачі, перевіривши зайнятість радіоканалу.

Процедура повторної спроби передачі через випадковий інтервал часу має позитивний ефект за великої інтенсивності трафіку, оскільки при цьому виникає ефект розрівнювання. За відносно низької інтенсивності трафіку перенесення повторної спроби передачі призводить до зниження ефективності використання радіоканалу. Цей недолік усувається в протоколі CSMA з жорсткою стратегією, коли при виявленні зайнятого стану радіоканалу абонент не відкладає спробу передачі, а безперервно перевіряє наявність випромінювання, і розпочинає передачу, щойно радіоканал звільниться.

Постановка задачі

Протоколи CSMA добре досліджені для моделі трафіку з розподілом Пуассона [7]. При цьому використано одне з положень теорії відновлення, коли розглядається випадковий процес переходу радіоканалу з вільного стану в зайнятий стан чи навпаки.

Узагальнену діаграму роботи синхронних протоколів CSMA зображено на рис.1.

Час знаходження радіоканалу в кожному стані є випадковою величиною із середніми значеннями B_i для зайнятого стану, коли здійснюється передача, та I_i для вільного стану.

У стані передачі виділено стан успішної (безконфліктної) передачі із середнім значенням тривалості U_i . Загальне рівняння для середньої швидкості передачі визначено співвідношенням:

$$S_i = \frac{U_i}{B_i + I_i}, \quad (1)$$

де $i=1$ для протоколу CSMA з гнучкою стратегією, а $i=2$ — для протоколу CSMA з жорсткою стратегією.

У [7] для синхронного протоколу CSMA з гнучкою стратегією отримано рівняння середньої швидкості передачі:

$$S_{1p} = \frac{\tau G e^{-\tau G}}{\tau - e^{-\tau G} + 1}, \quad (2)$$

де G — інтенсивність трафіку, τ — тривалість одного такту роботи радіоканалу. У цьому рівнянні всі параметри нормовано до тривалості передачі пакетів T та прийнято $T=1$.

Відомим є також рівняння середньої швидкості передачі для синхронного CSMA з жорсткою стратегією [7]:

$$S_{2p} = \frac{G e^{-G(1+\tau)}(1+\tau - e^{-\tau G})}{(1+\tau)(1 - e^{-\tau G}) + \tau e^{-G(1+\tau)}}.$$

Метою даної статті є побудова математичної моделі роботи синхронних протоколів CSMA з гнучкою та жорсткою стратегіями в умовах самоподібного трафіку, отримання рівнянь середньої швидкості передачі та їх порівняльний аналіз з результатами досліджень цих же протоколів для трафіку з розподілом Пуассона [7].

Математична модель

Отримаємо рівняння середньої швидкості передачі для самоподібного трафіку. У [5] показано, що найточніше на рівні управління доступом до спільного каналу передачі даних випадковий процес передачі визначається розподілом Парето, який має декілька форм [3]. Ми використаємо розподіл Парето другого типу, тобто той, який зсунуто до початку координат:

$$P = Pr[\text{інтервал між передачами} > t] = \left(\frac{t+k}{k}\right)^{-\alpha}, \quad (3)$$

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 $T=1$ отримуємо: $k = (\alpha - 1) / G$.

Тоді рівняння (3) матиме вигляд:

$$P = \left(\frac{tG + \alpha - 1}{\alpha - 1} \right)^{-\alpha}. \quad (4)$$

Для протоколу CSMA з гнучкою стратегією кількість тактів радіоканалу у вільному стані є випадковою величиною з геометричним розподілом та середнім значенням:

$$n_{11} = \sum_{i=0}^{\infty} iP^{i-1}(1-P) = \frac{(\alpha - 1)^{-\alpha}}{(\alpha - 1)^{-\alpha} - (\tau G + \alpha - 1)^{-\alpha}}.$$

Тоді:
$$I_1 = \frac{\tau(\alpha - 1)^{-\alpha}}{(\alpha - 1)^{-\alpha} - (\tau G + \alpha - 1)^{-\alpha}}.$$

Кількість передач у зайнятому стані радіоканалу є також випадковою величиною з геометричним розподілом та середнім значенням:

$$n_{B1} = \sum_{i=0}^{\infty} i(1-P)^{i-1}P = \left(\frac{G\tau + \alpha - 1}{\alpha - 1} \right)^{\alpha},$$

отже:
$$B_1 = (1 - \tau) \left(\frac{G\tau + \alpha - 1}{\alpha - 1} \right)^{\alpha}.$$

Визначмо середню тривалість роботи радіоканалу, коли здійснюється успішні (безконфліктні) передачі. Ймовірність кожної успішної передачі в періоді зайнятості визначається ймовірністю появи передачі в останньому вільному такті роботи радіоканалу. Очевидно, що момент t (рис.1) появи передачі може настати в будь-якому місті такту з імовірністю $1/\tau$. Для розподілу Парето необхідно визначати ймовірність надходження інших передач, як до моменту t , так і після нього, тобто на інтервалі $(\tau - t)$.

Виходячи з (4) ймовірність відсутності інших передач до моменту t дорівнює $\left(\frac{\tau G + \alpha - 1}{\alpha - 1} \right)^{-\alpha}$, а після нього $\left(\frac{(\tau - t)G + \alpha - 1}{\alpha - 1} \right)^{-\alpha}$.

Ці дві події є незалежними, отже загальна ймовірність успішної передачі може бути визначена шляхом множення їх. Враховуючи це, та ймовірність самого факту появи передачі, отримуємо шляхом інтегрування всіх можливих передач у межах такту ймовірність успішної передачі:

$$U_{\tau 1} = \frac{(\alpha - 1)^{2\alpha}}{\tau}.$$

$$\cdot \int_0^{\tau} [tG + \alpha - 1]^{-\alpha} [(\tau - t)G + \alpha - 1]^{-\alpha} dt.$$

А з урахуванням n_{B1} середнє значення часу успішної передачі в зайнятому стані радіоканалу має вигляд:

$$U_1 = \frac{(G\tau + \alpha - 1)^{\alpha} (\alpha - 1)^{\alpha}}{\tau}.$$

$$\cdot \int_0^{\tau} [tG + \alpha - 1]^{-\alpha} [(\tau - t)G + \alpha - 1]^{-\alpha} dt.$$

Підставивши U_1 , B_1 та I_1 в (1) маємо рівняння для розрахунку середньої швидкості передачі для протоколу CSMA з гнучкою стратегією (5):

$$S_1 = \frac{[(\alpha - 1)^{\alpha} - (G\tau + \alpha - 1)^{-\alpha}] \int_0^{\tau} [tG + \alpha - 1]^{-\alpha} [(\tau - t)G + \alpha - 1]^{-\alpha} dt}{\tau(\alpha - 1)^{-2\alpha} [(1 + \tau)((\alpha - 1)^{-\alpha} - (G\tau + \alpha - 1)^{-\alpha}) + \tau(G\tau + \alpha - 1)^{-\alpha}]}.$$

Отримаємо рівняння середньої швидкості передачі для протоколу CSMA з жорсткою стратегією. Очевидно, що кількість тактів радіоканалу у вільному стані є такою ж, як і для CSMA з гнучкою стратегією, тобто $n_{12} = n_{11}$, а якщо так, то і $I_2 = I_1$.

Кількість передач у зайнятому стані радіоканалу є також випадковою величиною з геометричним розподілом та середнім значенням:

$$n_{B2} = \sum_{i=0}^{\infty} i(1-P)^{i-1}P = \left(\frac{G(1 + \tau) + \alpha - 1}{\alpha - 1} \right)^{\alpha}.$$

Отже:
$$B_2 = (1 + \tau) \left(\frac{G(1 + \tau) + \alpha - 1}{\alpha - 1} \right)^{\alpha}.$$

Визначмо середню тривалість роботи радіоканалу, коли здійснюються успішні (безконфліктні) передачі. Ймовірність першої успішної передачі в періоді зайнятості визначається ймовірністю появи передачі в останньому вільному такті роботи радіоканалу, а якщо так, то $U_{\tau 2} = U_{\tau 1}$.

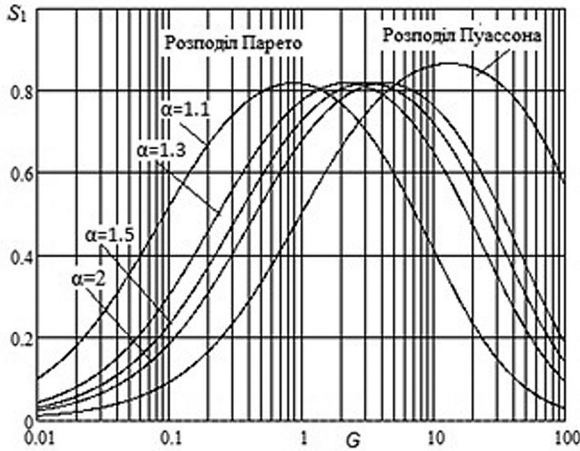


Рис. 2. Середня швидкість передачі протоколу CSMA з гнучкою стратегією

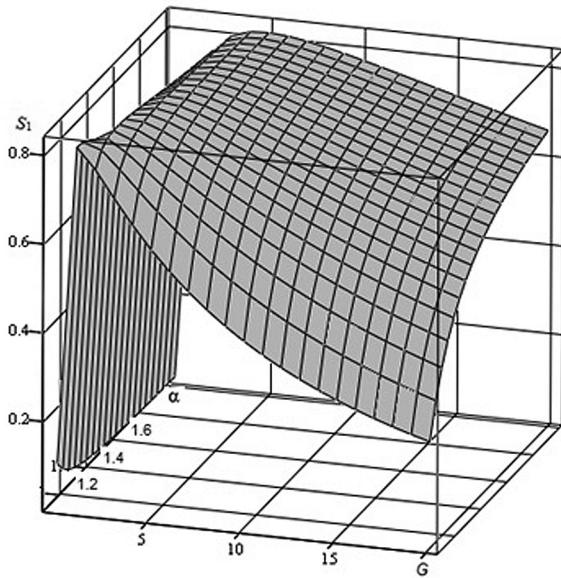


Рис. 3. Середня швидкість передачі CSMA з гнучкою стратегією для моделі трафіку з розподілом Парето

Аналогічно з урахуванням, що наступні передачі в зайнятому стані надходять на інтервалі $(1 + \tau)$, отримуємо ймовірність безконфліктності кожної з них:

$$U_{(1+\tau)2} = \frac{(\alpha - 1)^2 \alpha (\alpha - 1)^\alpha}{1 + \tau} \cdot \int_0^{1+\tau} [tG + \alpha - 1]^{-\alpha} [(1 + \tau - t)G + \alpha - 1]^{-\alpha} dt.$$

Тоді, беручи до уваги загальну кількість передач у зайнятому періоді, рівняння для середньої тривалості успішної передачі в зайнятому періоді можна записати у вигляді:

$$U_2 = U_{\tau 2} + (n_{B2} - 1)U_{(1+\tau)2} = \frac{(\alpha - 1)^{2\alpha}}{\tau} \cdot \int_0^\tau [tG + \alpha - 1]^{-\alpha} [(\tau - t)G + \alpha - 1]^{-\alpha} dt + \frac{[(G(1 + \tau) + \alpha - 1)^\alpha - (\alpha - 1)^\alpha](\alpha - 1)^\alpha}{1 + \tau} \cdot \int_0^{1+\tau} [tG + \alpha - 1]^{-\alpha} [(1 + \tau - t)G + \alpha - 1]^{-\alpha} dt.$$

Після підстановки U_2 , B_2 та I_2 в (1) отримаємо рівняння для розрахунку середньої швидкості передачі для протоколу CSMA з жорсткою стратегією при самоподібному трафіку:

$$S_2 = \left[\frac{(\alpha - 1)^{2\alpha} [(\alpha - 1)^{-\alpha} - (\tau G + \alpha - 1)^{-\alpha}]}{\tau + (1 + \tau)[(1 + \tau)G + \alpha - 1]^\alpha [(\alpha - 1)^{-\alpha} - (\tau G + \alpha - 1)^{-\alpha}]} \right] \cdot \left[\frac{(\alpha - 1)^\alpha}{\tau} \int_0^\tau (tG + \alpha - 1)^{-\alpha} [(\tau - t)G + \alpha - 1]^{-\alpha} dt + \frac{(G(1 + \tau) + \alpha - 1)^\alpha - (\alpha - 1)^\alpha}{1 + \tau} \cdot \int_0^{1+\tau} (tG + \alpha - 1)^{-\alpha} [(1 + \tau - t)G + \alpha - 1]^{-\alpha} dt \right]. \quad (6)$$

Аналіз результатів

Рівняння (5) і (6) середньої швидкості передачі протоколів CSMA дають змогу розрахувати три основні параметри: максимальне значення середньої швидкості передачі $S_{i\max}$, межу стійкості $G_{i\max}$ та пропускну здатність $C_i = S_{i\max} G_{i\max}$.

На рис. 2 показано графіки середньої швидкості передачі протоколу CSMA з гнучкою стратегією $S_1(G)$ для моделі трафіку з розподілом Пуассона, побудованого за формулою (2), та графіки середньої швидкості передачі цього протоколу для розподілу Парето, побудованих за формулою (5) при декількох значеннях параметра α та при $\tau = 0,01$. При виборі значень α було враховано залежність параметра форми розподілу Парето від міри самоподіб-

ності трафіку (показника Хьорста H) [2]: $\alpha = 3 - 2H$. Оскільки параметр Хьорста може змінюватися в діапазоні $H \in [0,5; 1]$, то $\alpha \in [1, 2]$.

На рис. 3 представлено залежність середньої швидкості передачі протоколу CSMA з гнучкою стратегією від інтенсивності трафіку та міри самоподібності трафіку з розподілом Парето.

Максимальна середня швидкість передачі протоколу CSMA з гнучкою стратегією при самоподібному трафіку практично не змінюється в усьому діапазоні значень параметра α , залишаючись на рівні 0,818, що на 5,4% менше, ніж при моделі трафіку з розподілом Пуассона. Але при цьому спостерігається значне зменшення меж стійкості та пропускної здатності протоколу. Для протоколу з гнучкою стратегією модель з розподілом Пуассона недооцінює від 3,8 (при $\alpha = 1,8$) до 16,6 (при $\alpha = 1,1$) разів межу стійкості роботи протоколу при наявності самоподібного трафіку. Відповідно зменшується і пропускна здатність протоколу від $C_1 = 3,272$ (в 3,97 рази при $\alpha = 1,8$) до $C_1 = 0,736$ (в 17,63 рази при $\alpha = 1,1$) порівняно з пропускною здатністю для моделі трафіку з розподілом Пуассона $C_1 = 0,865$.

На рис.4 показано графіки середньої швидкості передачі протоколу CSMA з жорсткою стратегією $S_2(G)$ для моделі трафіку з розподілом Пуассона, побудованого за формулою (3), та графіки середньої швидкості цього протоколу для розподілу Парето, побудованих за формулою (6) при декількох значень параметра α та при $\tau = 0,01$.

На рис. 5 представлено залежність середньої швидкості передачі протоколу CSMA з жорсткою стратегією від інтенсивності трафіку та міри самоподібності трафіку з розподілом Парето.

З графіка видно, що максимальне значення середньої швидкості передачі протоколу CSMA з жорсткою стратегією є практично незмінним на рівні 0,47 для різних значень параметра α , залишаючись нижчим на 11% від максимальної середньої швидкості передачі протоколу з трафіком за моделлю Пуассона (0,53). Суттєвим є те, що за самоподібного

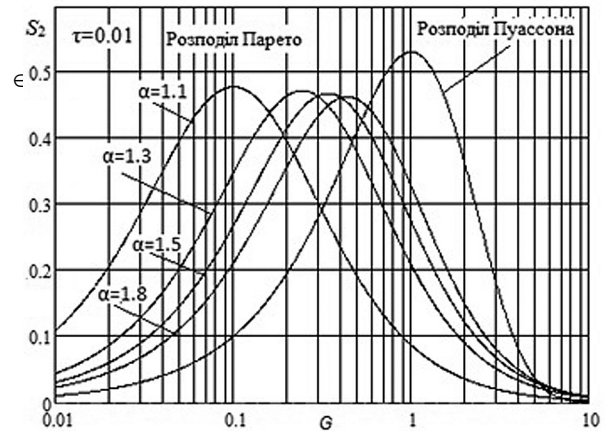


Рис. 4. Середня швидкість передачі протоколу CSMA з жорсткою стратегією для моделі трафіку з розподілом Парето та Пуассона

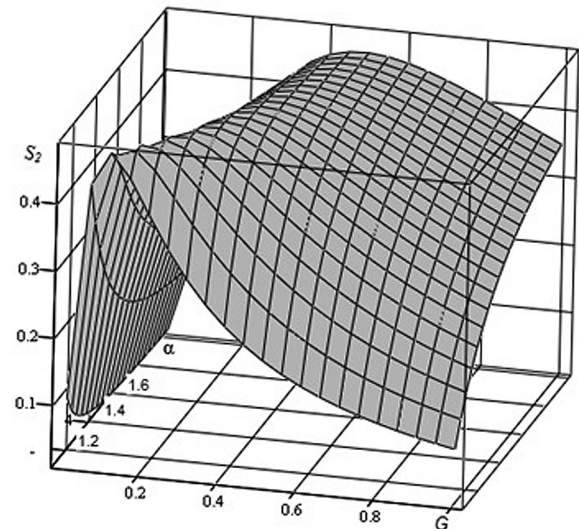


Рис. 5. Середня швидкість передачі CSMA з жорсткою стратегією для моделі трафіку з розподілом Парето

трафіку значно змінюється межа стійкості протоколу. Наприклад, при $\alpha = 1,1$ вона є нижчою в 10 разів порівняно з межею стійкості за моделлю трафіку з розподілом Пуассона. При зниженні параметра α спостерігається зниження меж стійкості, оскільки при цьому зростає довгострокова залежність трафіку (параметр Хьорста). За більшої за межу стійкості інтенсивності трафіка радіомережа не може стабільно функціонувати через лавиноподібне зростання кількості

конфліктів в радіоканалі. Тобто модель трафіку з розподілом Пуассона для протоколу з жорсткою стратегією недооцінює від 2,5 (при $\alpha = 1,8$) до 10 (при $\alpha = 1,1$) разів межу стійкості (граничне навантаження) роботи протоколу при наявності самоподібного трафіку. Відповідно зменшується і пропускна здатність протоколу від $C_2 = 0,165$ (в 3,2 рази при $\alpha = 1,8$) до $C_2 = 0,047$ (в 11,3 рази при $\alpha = 1,1$) порівняно з пропускною здатністю для моделі трафіку з розподілом Пуассона $C_2 = 0,53$.

Висновки

Запропонована математична модель протоколів CSMA з гнучкою та жорсткою стратегіями дає можливість розрахувати значення середньої швидкості, межі стійкості

та пропускної здатності цих протоколів в умовах самоподібного трафіку для заданого набору параметрів.

Самоподібний трафік суттєво зменшує межу стійкості протоколів CSMA та їхню пропускну здатність порівняно з розрахунками за моделлю розподілу Пуассона, що має бути враховано при використанні цих протоколів у радіомережах з довгостроковою залежністю в розподілі трафіку.

Наявність самоподібного трафіку призводить до незначного зниження максимальної середньої швидкості передачі протоколів CSMA порівняно з моделлю трафіку з розподілом Пуассона, причому протокол з жорсткою стратегією доступу має приблизно вдвічі більше зниження середньої швидкості порівняно з гнучкою стратегією протоколу.

ЛІТЕРАТУРА

1. Карпукhin А.В., Кириченко Л.О., Радивилова Т.А. Самоподобие в информационных системах. Прикладная радиоэлектроника, 2008, Том 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. Войтер А.П. Порівняльний аналіз стратегій адаптації довжини пакетів при конкурентному доступі до радіоканалу. Наукові вісті Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут". 2007. № 6. С.11–15.
6. Ильченко М.Е., Бунин С.Г., Войтер А.П., Романюк В.А. Самоорганизующиеся радиосети со сверхширокополосными сигналами. К.: Наукова думка, 2012. 444 с.
7. 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. COM-23, № 12, pp. 1400–1416.

Надійшла 10.11.2022

REFERENCES

1. Karpukhin, A.V., Kirichenko, L.O., Radivilova, T.A., 2008. "Self-similarity in information systems". Applied radioelectronics, Volume 7, No. 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.*, 2003. Cellular radio networks with packet switching. K.: Naukova Dumka, 266 p. (In Russian).
5. *Voyter, 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).
6. *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).
7. *Kleinrock, L., Tobagi, F.A.*, 1975. “Packet Switching in Radio Channels: Part I- Carrier Sense Multiple-Access Modes and Their Throughput-Delay Characteristics”. IEEE Transactions on Communications. Vol. COM-23, no 12, pp. 1400 –1416.

Received 10.11.2022

A.P. Voiter, Doctor of Technical Sciences, Senior Scientist, Deputy Director of the Institute of Nuclear Research of the National Academy of Sciences of Ukraine, 47, Nauki Avenue, Kyiv, 03028, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2929-2954>, voiter@kinr.kiev.ua

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF SELF-SIMILAR TRAFFIC ON THE MULTIPLE ACCESS PROTOCOLS EFFICIENCY

Introduction. Traffic in modern telecommunication radio networks is self-similar, therefore, the use of methods for calculating the parameters of Carrier Sense Multiple Access (CSMA) protocols adopted in the classical theory of teletraffic, based on Poisson distribution models, leads to an underestimation of the load and stability of these protocols.

Purpose. Build a mathematical model for the operation of synchronous CSMA protocols with flexible and rigid strategies in conditions of self-shaped traffic. Obtain average transmission rate equations and their comparative analysis of the results of studies of the same protocols for traffic with the Poisson distribution.

Methods. The goal is achieved by creating and analyzing a mathematical model for the operation of synchronous CSMA protocols with flexible and rigid strategies under conditions of Pareto-distributing traffic. The model is described by the equations of the average protocol transfer rate, which are a function of traffic intensity and Pareto distribution parameters.

Results. It has been proven that self-similar traffic has a significant impact on the stability limit of CSMA protocols and their throughput, which must be taken into account when using these protocols in radio networks with long-term dependence on traffic distribution. At the same time, there is a slight decrease in the maximum average transmission rate of CSMA protocols compared to the traffic model with the Poisson distribution.

Conclusions. The proposed mathematical model of CSMA protocols with flexible and rigid strategies makes it possible to calculate the real values of the average speed, stability limit, and throughput of these protocols under conditions of self-similar traffic.

Keywords: *CSMA protocols, self-similar traffic, Pareto distribution, mathematical model, transmission rate, stability limit, throughput.*