

УДК 681.324:621.325

Ю.В. Стасєв, Г.А. Кучук, О.О. Можєєв

Харківський університет Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба, Харків

ВПЛИВ ПОМИЛКИ ПРОГНОЗУВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАФІКА НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ТРАНСПОРТНОГО ПРОТОКОЛУ МЕРЕЖІ

Проведений аналіз впливу помилок прогнозування фрактального телекомунікаційного трафіка на ефективність протоколу TCP, що використовує такий механізм. Розглянуті випадки існування двох і більше з'єднань. Приведені графіки залежності ефективності протоколу TCP від помилки прогнозування для цих випадків.

протокол TCP, трафік, фрактальність, масштабна інваріантність, мережеві протоколи, модель, телекомунікаційна мережа, плаваюче вікно, прогнозування

Вступ

Постановка задачі та аналіз літератури. Численні дослідження трафіку мереж передачі даних автоматизованої системи управління військами доводять наявність самоподібної природи або присутності довгочасової залежності (ДЧЗ) [1 – 3] в цих мережах. Особливостями сучасного трафіку також є наявність післядії і масштабна інваріантність статистичних характеристик [1, 4 – 7]. Такий характер трафіку у великих масштабах часу може привести до нерівномірності завантаження існуючих каналів мереж передачі даних, яка характеризується або перевантаженням або недостатнім використанням виділених каналів. Під час перевантажень можна спостерігати значні затримки при передачі пакетів і навіть втрати пакетів при переповнюванні буферів, що призводить до падіння продуктивності мережі і з'єднання в цілому.

В той же час, наявність ДЧЗ в трафіку робить можливим дослідження і застосування принципово нових методів управління інформаційними потоками в телекомунікаційній мережі, які дозволяють значно підвищити ефективність роботи існуючих управляючих протоколів [8].

До цього часу неіснуючі моделі і реалізації протоколу TCP не враховують багаторівневі, ієрархічні процеси, що протікають в сучасних телекомунікаційних мережах. У джерелі [9] відмічено, що ієрархія протоколів може бути можливою причиною мультифрактальності. Особливістю ДЧЗ є те, що щільності розподілу ймовірності випадкових величин, якими характеризуються трафікові процеси, є не гауссовими, а ступеневими, для яких до теперішнього часу повністю не вирішена задача точності і достовірності проведених досліджень [10, 11]. Таким чином, завдання визначення впливу помилок прогнозування трафіку на ефективність функціонування транспортних протоколів є **актуальним**.

Метою даної статті є дослідження впливу помилки прогнозування доступного розміру смуги пропускання каналу, що є вузьким місцем маршруту, на ефективність транспортних протоколів і рівномірність розподілу ресурсів.

1. Результати теоретичних досліджень

У даній статті проводиться аналіз впливу помилок прогнозування на продуктивність протоколу управління в мережі, на основі протоколу TCP, запропонованого в [12], який використовує механізм прогнозування майбутнього трафіку.

Нехай $\bar{X}_i^{(m)}(n+1)$ та $X_i^{(m)}(n+1)$ позначають оцінене з урахуванням n останніх вимірювань та дійсне значення продуктивності, досягнутої з'єднанням і відповідно. Тоді відносна помилка прогнозування може бути записана як

$$\tau_i(n) = \frac{\bar{X}_i^{(m)}(n+1) - X_i^{(m)}(n+1)}{X_i^{(m)}(n+1)}, \quad (1)$$

а індекс справедливого розподілу обчислювального ресурсу для N з'єднань r -го каналу дорівнює

$$F_r = \frac{\left(\sum_{i=1}^N X_i^{(m)}(n)\right)^2}{N \left(\sum_{i=1}^N \left(X_i^{(m)}(n)\right)^2\right)}. \quad (2)$$

Згідно із (2), максимальне значення $F_r = 1$ досягається у випадку, коли доступний розмір смуги пропускання розглядаємого каналу, що є вузьким місцем (C пакетів), рівномірно розподілений між всіма N з'єднаннями, тобто

$$X_i^{(m)}(n) = \frac{C}{N}, \quad i = \overline{1, N}.$$

Далі буде проведена оцінка впливу $\tau_i(n)$ на F_r при різній кількості з'єднань. Будемо розглядати тривіальний випадок ($N = 2$) і випадок більшої кількості з'єднань ($N > 2$).

1.1. Випадок двох з'єднань. Спочатку проведемо дослідження за достатньо тривіальної умови $N = 2$. Нехай

$$\gamma = \max(|\tau_1(n)|, |\tau_2(n)|).$$

Тоді, як показано на рис. 1, а, передбачена оптимальна робоча точка, в якій досягається максимум F_T потрапляє усередину квадрата з центром, що має координати $(C/2, C/2)$, розміром $C_\gamma \times C_\gamma$ ($C_\gamma \approx C\gamma$) – кількість пакетів, що визначає максимальну помилку прогнозування). Якщо розмір буфера маршрутизатора для каналу, що є вузьким місцем, дорівнює V (пакетів), то втрата пакетів відбувається тільки тоді (рис. 1, а), коли робоча точка знаходиться за лінією

$$f + B = C + V / T_p,$$

де T_p – час передачі одного пакету.

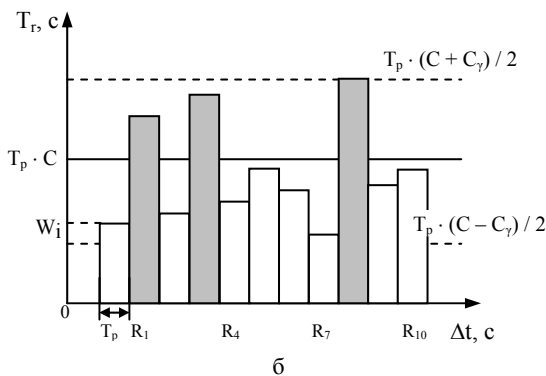
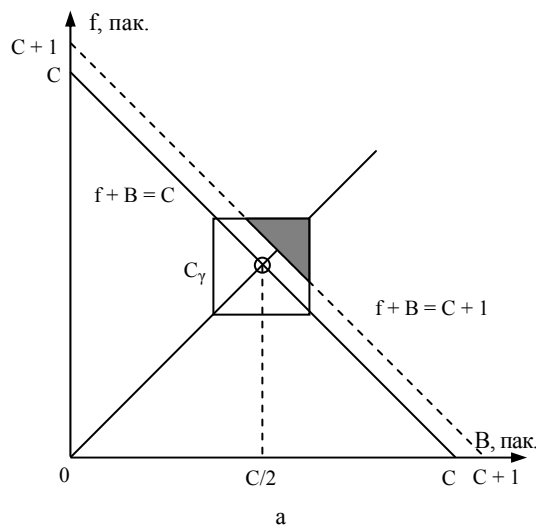


Рис. 1. Аналіз стану "вузького місця" ($N = 2$): а – фазова площина; б – гістограма інтервальних значень

Нехай $L = \lceil V/T_p \rceil + 1$, де $\lceil \cdot \rceil$ – ціла частина відповідного числа. Для зручності аналізу можна припустити, що прогнозування робиться незалежно для кожного з'єднання і в незалежні інтервали часу, що не перекриваються. Ймовірність того, що передбачена оптимальна точка опиниться вище лінії $f + B = C$, розраховується як

$$p = \begin{cases} 0,5 \left(1 - \frac{L}{C_\gamma}\right)^2, & C_\gamma \geq L; \\ 0, & C_\gamma < L. \end{cases} \quad (3)$$

Як показано на рис. 1, б, на кожному з інтервалів R_i розміри всіх вікон W_i при використанні протоколу TCP, запропонованого в [11], лежать в інтервалі між двома пунктирними лініями $T_p \cdot (C - C_\gamma) / 2$ та $T_p \cdot (C + C_\gamma) / 2$. Крім того, в часових інтервалах R_1, R_3 і R_8 відбувається перевантаження і розмір вікна зменшується вдвічі. Тоді довгочасово досяжна продуктивність T_h може бути обчислена як

$$T_h = \lim_{M \rightarrow \infty} \frac{\sum_{n=1}^M W_i(n)}{M \times T_p} = \lim_{M \rightarrow \infty} \frac{M_c \overline{W}_c + M_d \overline{W}_d + M_u \overline{W}_u}{M \times T_p}, \quad (4)$$

де M – загальна кількість інтервалів, яка дорівнює

$$M = M_c + M_d + M_u;$$

M_c, M_d і M_u – відповідно кількість інтервалів, на яких відбувається перевантаження, кількість інтервалів, що ідуть слідом безпосередньо за інтервалом, в якому відбулося перевантаження, і кількість інших інтервалів; $\overline{W}_c, \overline{W}_d, \overline{W}_u$ – середні розміри вікон на інтервалах M_c, M_d і M_u , відповідно.

Грунтуючись на припущенні про рівномірний розподіл з імовірністю p , передбачена оптимальна точка потрапляє за розширену лінію максимальної ємності і відбувається перевантаження. Слідом за інтервалом, в якому відбувається перевантаження, настає фаза мультиплікативного зменшення [12, 13], розмір вікна зменшується в два рази і робоча точка переміщується нижче лінії $f + B = C + V / T_p$. Тоді в наступному інтервалі виконується нове прогнозування і цикл повторюється. У результаті отримуємо наступні співвідношення:

$$\begin{aligned} M_c = M_d &= \frac{p}{1+p} \cdot M; \\ M_u &= \frac{1-p}{1+p} \cdot M. \end{aligned} \quad (5)$$

Для полегшення обчислення величин $\overline{W}_c, \overline{W}_d, \overline{W}_u$ спочатку доведемо дві леми:

Лема 1. Для двох випадкових змінних X і Y із загальною функцією щільності ймовірності:

$$f(x, y) = \begin{cases} \left(\frac{(b-a)^2}{2}\right)^{-1}, & \text{якщо } (x, y) \in S_{\Delta 1}; \\ 0, & \text{інакше,} \end{cases}$$

де $S_{\Delta 1}$ – множина точок заштрихованого трикутника (рис. 2, а), є вірним наступне співвідношення:

$$\overline{X} = \overline{Y} = \frac{a+2b}{3}.$$

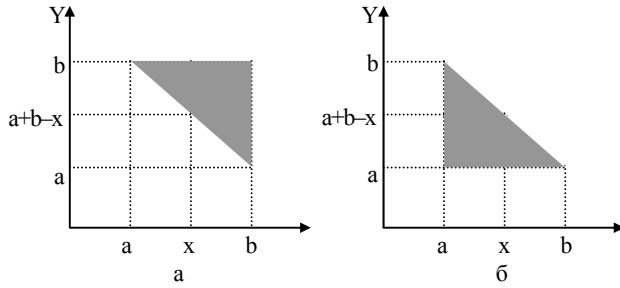


Рис. 2. Области визначення сумісних функцій щільності ймовірності (а – лема 1, б – лема 2)

Доведення. Безпосередньо розрахуємо математичне сподівання випадкової величини X , виходячи з визначення загальної функцією щільності ймовірності:

$$\begin{aligned} \bar{X} &= \iint_{S_{\Delta 1}} x^1 y^0 f(x, y) dx dy = \\ &= \int_a^b \int_{a+b-x}^b x \cdot \frac{2}{(b-a)^2} dx dy = \\ &= \frac{2}{(b-a)^2} \int_a^b x dx \int_{a+b-x}^b dy = \frac{2}{(b-a)^2} \int_a^b x(x-a) dx = \\ &= \frac{2}{(b-a)^2} \frac{(b-a)^2}{6} (a+2b) = \frac{a+2b}{3}. \end{aligned}$$

Виходячи із симетрії наведеного двовимірного розподілу зазначаємо, що $\bar{X} = \bar{Y} = \frac{a+2b}{3}$, що і треба було довести.

Лема 2. Для двох випадкових змінних X і Y із загальною функцією щільності ймовірності:

$$f(x, y) = \begin{cases} \left(\frac{(b-a)^2}{2} \right)^{-1}, & \text{якщо } (x, y) \in S_{\Delta 2}; \\ 0, & \text{інакше,} \end{cases}$$

де $S_{\Delta 2}$ – множина точок заштрихованого трикутника (рис. 2, а), є вірним наступне співвідношення:

$$\bar{X} = \bar{Y} = \frac{2a+b}{3}.$$

Зазначена лема є наслідком леми 1 (треба провести зміну координатних осей).

У разі, коли $C_\gamma \leq L$, робоча точка завжди потрапляє нижче лінії $f + B = C + V / T_p$ і не відбувається втрат пакетів ($p = 0$), отже:

$$\begin{aligned} T &= C / 2; \\ F_T &= 1. \end{aligned}$$

На рис. 3 зображена збільшена версія квадрата (рис. 1, а), що характеризує помилку прогнозування у разі, коли $C_\gamma \geq L$.

Коли робоча точка потрапляє в заштриховану область D , відбувається втрата пакету.

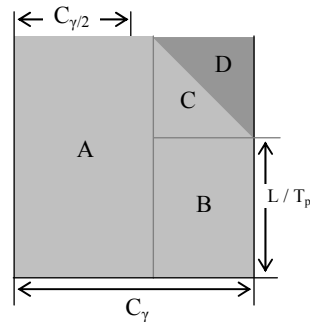


Рис. 3. Розбиття області знаходження робочої точки ($N = 2$)

При припущенні про рівномірний розподіл і використовуючи лему 1, значення \bar{W}_c може бути визначене як

$$\begin{aligned} \bar{W}_c &= \frac{T_p}{3} \cdot \left(\left(\frac{C-C_\gamma}{2} + L \right) + 2 \left(\frac{C}{2} + \frac{C_\gamma}{2} \right) \right) = \\ &= \frac{T_p \cdot ((3+\gamma)C + 2L)}{6}. \end{aligned} \quad (6)$$

Оскільки в наступному інтервалі з перевантаженням розмір вікна зменшується в два рази, середній розмір вікна \bar{W}_d отримає значення

$$\bar{W}_d = \frac{\bar{W}_c}{2} = \frac{T_p \cdot ((3+\gamma)C + 2L)}{12}. \quad (7)$$

Тепер обчислимо значення \bar{W}_u . Як показано на рис. 3, робоча точка може бути в області A , B або C . Провівши оцінку геометричної ймовірності знаходження робочої точки, можна показати, що:

а) з ймовірністю

$$P_A = \frac{2C_\gamma L}{C^2 \gamma^2 + 2C_\gamma L - L^2}$$

робоча точка знаходиться в області A , а розмір плаваючого вікна рівномірно розподілений в інтервалі $\left[\frac{C}{2} - \frac{C_\gamma}{2}, \frac{C}{2} - \frac{C_\gamma}{2} + L \right]$;

б) з ймовірністю

$$P_B = \frac{2C_\gamma L - 2L^2}{C^2 \gamma^2 + 2C_\gamma L - L^2}$$

робоча точка знаходиться в області B , а розмір плаваючого вікна рівномірно розподілений в інтервалі $\left[\frac{C}{2} - \frac{C_\gamma}{2} + L, \frac{C}{2} + \frac{C_\gamma}{2} \right]$;

в) з ймовірністю

$$1 - P_A - P_B$$

робоча точка знаходиться в області C , а середній розмір плаваючого вікна \bar{W}_u може бути обчислений з використанням леми 2 як

$$E(W_u) = P_A \cdot T_p \cdot \frac{\left(\frac{C}{2} - \frac{C_\gamma}{2} + L\right) + \left(\frac{C}{2} - \frac{C_\gamma}{2}\right)}{2} +$$

$$+ P_B \cdot T_p \cdot \frac{\left(\frac{C}{2} - \frac{C_\gamma}{2} + L\right) + \left(\frac{C}{2} + \frac{C_\gamma}{2}\right)}{2} +$$

$$+ (1 - P_A - P_B) \cdot \frac{T_p \cdot (3C + 4L - C_\gamma)}{6}. \quad (8)$$

Підставляючи вирази (5) – (8) до (4), одержимо

$$T_h = \frac{1}{12(1+p)} \times$$

$$\times (p((3+5\gamma)C - 2L) + 2(1-p) \times$$

$$\times (C_\gamma(P_B - 2P_A) - L(P_A + P_B)) + (6 - 2\gamma)C + 8L), \quad (9)$$

де

$$P_A = \frac{2C_\gamma L}{C^2 \lambda^2 + 2C_\gamma L - L^2};$$

$$P_B = \frac{2C_\gamma L - 2L^2}{C^2 \gamma^2 + 2C_\gamma L - L^2}.$$

1.2. Випадок значної кількості з'єднань (N > 2).

На рис. 4 показаний графік для випадку, коли величина помилки прогнозування обмежена значеннями γ та N. Передбачена оптимальна робоча точка тепер знаходиться в прямокутнику із сторонами

$$\frac{2C_\gamma}{N} \text{ і } \frac{2(N-1)C_\gamma}{N}.$$

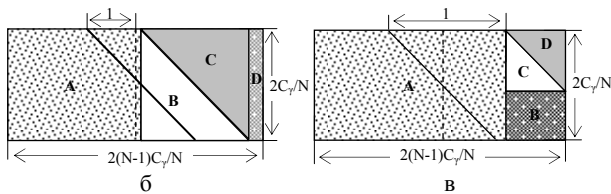
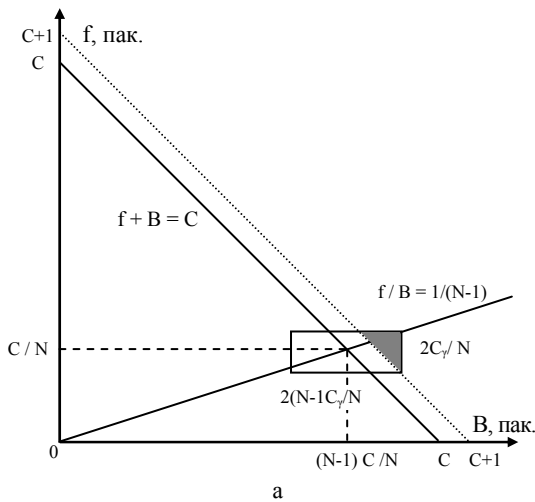


Рис. 4. Аналіз стану "вузького місця" (N > 2):
а – фазова площина; б, в – розбиття області
знаходження робочої точки

Аналіз імовірності прогнозування місцеположення робочої точки проводитимемо аналогічно попередньому способу на основі геометричної ймовірності. Коли робоча точка потрапляє в заштриховану область, відбувається втрата пакету. Як показано на рис. 4, б – в), можливі три наступні випадки.

1.2.1. Перший випадок. В цьому випадку

$$0 \leq L \leq \frac{N-2}{2N} \cdot C_\gamma$$

і прямокутна область може бути розділена на чотири області: А, В, С і D (рис. 4, б).

Коли робоча точка потрапляє в область С або D, відбувається втрата пакету, ймовірність якої може бути обчислена як

$$p = \frac{(N-1)C_\gamma - NL}{2(N-1)C_\gamma}.$$

Тоді

$$M_c = M_d = \frac{p}{1+p} \cdot M, \text{ а } M_u = \frac{1-p}{1+p} \cdot M.$$

Для обчислення значень величин \overline{W}_c та \overline{W}_d необхідно відзначити, що при втраті пакету:

а) з імовірністю

$$P_c = \frac{C_\gamma}{(N-1)C_\gamma - NL}$$

робоча точка потрапляє до області С і середній розмір вікна згідно з лемою 1 дорівнює

$$T_p \cdot \frac{2\left(\frac{C}{N} + \frac{C_\gamma}{N}\right) + \left(\frac{C}{N} - \frac{C_\gamma}{N}\right)}{3} = T_p \cdot \left(\frac{C}{N} + \frac{C_\gamma}{3N}\right);$$

б) з імовірністю

$$1 - P_c$$

робоча точка потрапляє до області D і середній розмір вікна дорівнює $T_p \cdot \frac{C}{N}$. Отже,

$$\overline{W}_c = P_c \cdot T_p \cdot \left(\frac{C}{N} + \frac{C_\gamma}{3N}\right) + (1 - P_c) \cdot T_p \cdot \frac{C}{N} \quad (10)$$

та

$$\overline{W}_d = \frac{\overline{W}_c}{2}. \quad (11)$$

Для обчислення \overline{W}_u відзначимо, що за відсутності втрат пакетів:

а) з імовірністю

$$P_A = \frac{C_\gamma}{(N-1)C_\gamma + NL}$$

робоча точка потрапляє до області А і середній розмір вікна дорівнює $T_p \cdot \frac{C}{N}$;

б) з імовірністю

$$1 - P_A$$

середній розмір вікна згідно леми 2 дорівнює

$$T_p \cdot \left(\frac{C}{N} - \frac{C\gamma}{3N} \right).$$

Отже,

$$\overline{W}_u = P_A \cdot T_p \cdot \frac{C}{N} + (1 - P_A) \cdot T_p \cdot \left(\frac{C}{N} - \frac{C\gamma}{3N} \right). \quad (12)$$

Нарешті, довгочасно досяжна продуктивність T_h може бути виражена як

$$T_h = \frac{1}{2(1+p)} \cdot \frac{C}{N} \cdot \left(2+p + \frac{C\gamma^2}{3} \times \left(\frac{3p}{(N-1)C\gamma - NL} - \frac{2(1-p)}{(N-1)C\gamma + NL} \right) \right). \quad (13)$$

1.2.2. Другий випадок. В цьому випадку

$$\frac{(N-2)C\gamma}{N} \leq L < C\gamma$$

і прямокутна область також може бути розділена на чотири області (рис. 4, в).

Коли робоча точка потрапляє до області D, відбувається втрата пакету, ймовірність якої може бути обчислена згідно аналогічним попередньому як

$$p = \frac{N^2(C\gamma - L)^2}{8(N-1)C^2\gamma^2}.$$

Аналогічно,

$$M_c = M_d = \frac{p}{1+p} \cdot M; \quad M_u = \frac{1-p}{1+p} \cdot M.$$

З використанням леми 2

$$\begin{aligned} \overline{W}_c &= T_p \cdot \frac{2 \left(\frac{C}{N} + \frac{C\gamma}{N} \right) + \left(\frac{C}{N} + L - \frac{(N-1)C\gamma}{N} \right)}{3} = \\ &= T_p \cdot \frac{3C + NL + (3-N)C\gamma}{3N}, \end{aligned} \quad (14)$$

отже, $\overline{W}_d = \frac{\overline{W}_c}{2}$, тобто

$$\overline{W}_d = T_p \cdot \frac{3C + NL + (3-N)C\gamma}{6N}. \quad (15)$$

Для обчислення значення \overline{W}_u , відзначимо, що:

а) з імовірністю

$$P_c = \frac{N^2(C\gamma - L)^2}{8C^2\gamma^2(N-1) - N^2(C\gamma - L)^2}$$

робоча точка потрапляє до області C і середній розмір вікна дорівнює

$$T_p \times \frac{\left(\frac{C}{N} + \frac{C\gamma}{N} \right) + 2 \left(\frac{C}{N} + L - \frac{(N-1)C\gamma}{N} \right)}{3} \quad (\text{лема 2});$$

б) з імовірністю

$$P_B = \frac{2N^2 \left(L - \frac{(N-2)C\gamma}{N} \right) (C\gamma - L)}{8C^2\gamma^2(N-1) - N^2(C\gamma - L)^2}$$

робоча точка потрапляє до області B і середній розмір вікна дорівнює $T_p \left(\frac{C}{N} + \frac{L}{2} - \frac{C\gamma}{2} \right)$;

в) з імовірністю

$$1 - P_c - P_B$$

робоча точка потрапляє до області A і середній розмір вікна дорівнює $T_p \cdot \frac{C}{N}$. Отже,

$$\begin{aligned} \overline{W}_u &= (1 - P_B - P_c) \cdot T_p \cdot \frac{C}{N} + P_B \cdot T_p \cdot \left(\frac{C}{N} + \frac{L}{2} - \frac{C\gamma}{2} \right) + \\ &+ P_c \cdot T_p \cdot \frac{\frac{C}{N} + \frac{C\gamma}{N} + 2 \left(\frac{C}{N} + L - \frac{(N-1)C\gamma}{N} \right)}{3}. \end{aligned} \quad (16)$$

Нарешті, у цьому випадку довгочасно досяжна продуктивність T_h може бути виражена як

$$\begin{aligned} T_h &= \frac{C}{(1+p)2N} \times \left(2+p + \frac{NpL}{C} + (3-N)p\gamma + \right. \\ &+ \frac{(1-p)LN}{3C} \times (3P_B + 4P_c) + \\ &\left. + \frac{(1-p)\gamma}{3} ((4-2N)P_c - 3NP_B) \right). \end{aligned} \quad (17)$$

1.2.3. Третій випадок. В даному випадку маємо $L < C\gamma$. Тут робоча точка завжди знаходиться в межах лінії $f + B = C + V / T_p$, не викликаючи втрат пакетів ($p = 0$), а, отже,

$$T = C / N; \quad F = 1.$$

2х Аналіз одриманих результатів

2.1. Випадок двох з'єднань. Приблизний графік залежності величини T_h від γ , отриманий згідно з виразом (9), наведений на рис. 5.

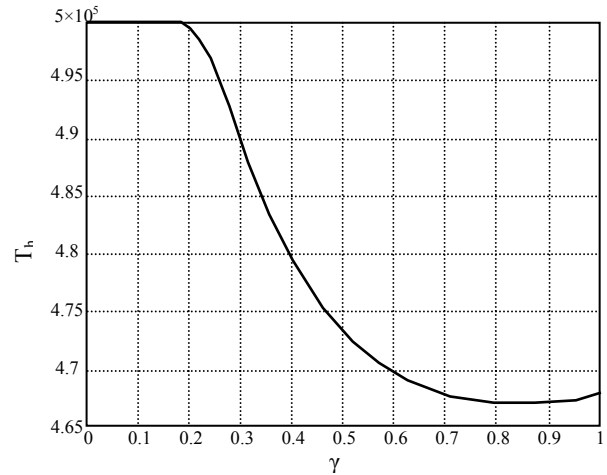


Рис. 5. Відношення довгочасно досяжної продуктивності T_h , до максимального відсотка помилок прогнозування γ для випадку двох з'єднань

З графіка (рис. 5) видно, що при збільшенні відносної помилки прогнозування від 0,2 до 0,5 величина T_h змінюється в межах від 5×10^6 до $4,8 \times 10^6$, тобто на 4%, а при зміні відносної помилки прогнозування від 0,2 до 1,0 величина T_h змінюється в межах від 5×10^6 до $4,65 \times 10^6$, тобто всього лише на 7%.

Скориставшись формулою (2), проведемо оцінку індексу справедливого розподілу обчислювального ресурсу F_r у разі $N = 2$.

Значення індексу складає $F_r = 0,9986$, що підтверджує незначний вплив помилок прогнозування на розподіл обчислювального ресурсу.

2.2. Випадок значної кількості з'єднань. Аналіз впливу помилок прогнозування зміни трафіку на індекс справедливості розподілу обчислювального ресурсу в даному випадку будемо проводити по аналогії з попереднім випадком з двома з'єднаннями.

На рис. 6 наведений приклад графіка залежності величини T_h від γ .

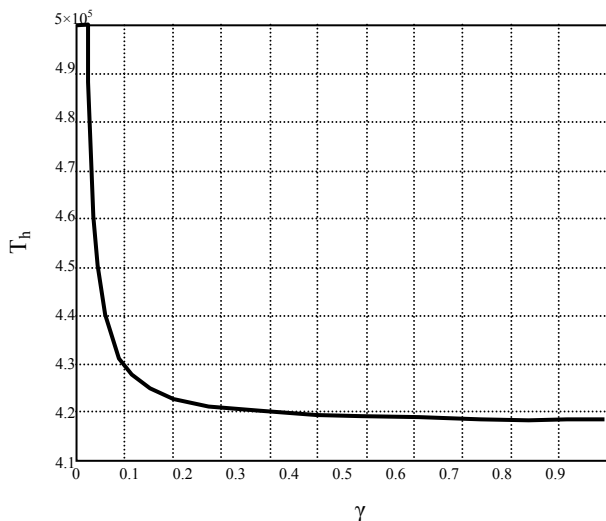


Рис. 6. Відношення довгочасно досяжної продуктивності T_h до максимального відсотка помилок прогнозування γ для випадку значної кількості з'єднань

З графіка (рис. 6) видно, що при збільшенні відносної помилки прогнозування до 0,1 величина T_h змінюється в межах від 5×10^6 до $4,3 \times 10^6$, тобто на 14%, а при зміні відносної помилки прогнозування від 0,1 до 1,0 величина T_h змінюється в межах від 5×10^6 до $4,65 \times 10^6$, тобто всього лише на 7%.

Знов скориставшись формулою (2), проведемо оцінку індексу справедливого розподілу обчислювального ресурсу F_r у випадку $N = 20$.

Нескладні обчислення показують, що значення індексу складає $F_r = 0,9994$, що також підтверджує

незначний вплив помилок прогнозувань на розподіл обчислювального ресурсу.

Порівнюючи результати оцінок F_r , отримані при різному числі з'єднань $N = 2$ і $N > 2$, можна відзначити, що збільшення числа з'єднань не тільки значно не зменшує величину F_r , але навіть і збільшує це значення.

Дослідження достовірності проведеної оцінки було проведено на підставі методу [10, 11]. Цей метод враховує той факт, що оцінювані випадкові величини характеризуються статечною щільністю розподілу (наприклад, розподілом Парето). Результати досліджень показують, що з імовірністю 0,995 значення індексу справедливого розподілу обчислювального ресурсу F_r знаходиться в інтервалі $0,9984 \leq F_r \leq 0,9997$ при різному числі з'єднань.

Висновки

У даній статті проведено дослідження впливу помилки прогнозування доступного розміру смуги пропускання каналу, яке є вузьким місцем маршруту, на ефективність транспортних протоколів і рівномірність розподілу ресурсів.

В результаті досліджень встановлено, що:

1. Довгочасно досяжна продуктивності T_h , не зазнає значних змін при збільшенні помилок прогнозування поведінки трафіку (зменшення на 7% при $N = 2$ і зменшення на 14% при $N > 2$).

2. Значення індексу справедливого розподілу обчислювального ресурсу F_r дорівнює

$$F_r = 0,9986 \text{ для } N = 2 \text{ і } F(r) = 0,9994 \text{ для } N = 20.$$

3. Проведені дослідження достовірності результатів свідчать, що з імовірністю 0,995 значення індексу справедливого розподілу обчислювального ресурсу F_r знаходиться в інтервалі

$$0,9984 \leq F_r \leq 0,9997$$

при різному числі з'єднань.

Напрямом подальших досліджень є визначення продуктивності мережного протоколу із врахуванням помилки прогнозування доступного розміру смуги пропускання каналу на рівномірність розподілу останньої.

Список літератури

1. Crovella M., Bestavros A. Self-similarity in World Wide Web traffic: evidence and possible causes // *IEEE ACM Transactions on Networking*. – 1997. – Vol.5. – P. 835-846.
2. Erramilli A., Narayan O., Willinger W. Experimental Queuing Analysis with Long-Range Dependent Traffic // *IEEE ACM Transactions on Networking*. – 1996. – № 7. – P. 96-104.
3. Willinger W., Taqqu M.S., Sherman R., Wilson D.V. Self-Similarity Through High-Variability: Statistical Analysis of Ethernet LAN Traffic at the Source Level // *ACM SIGCOMM'91, 1991*. – P. 149-157.
4. Leland W., Taqqu M., Willinger W. On the self-similar nature of IP-traffic // *IEEE/ACM Transactions on Networking*. – 1997. – № 3. – P. 423-431.

5. Фрактальный анализ процессов, структур и сигналов: Коллективная монография // Г.А. Кучук, А.А. Можжаев, Р.Э. Пащенко, К.М. Руккас. – Х.: ЭкоПерспектива, 2006. – 360 с.
6. Воробьев О.В. Моделирование самоподобного трафика синтезом ансамблю стохастических квазипериодических джерел та ON/OFF моделі // Системи озброєння і військова техніка. – 2006. – № 3 (6). – С.97-105.
7. Кучук Г.А., Можжаев О.О., Воробйов О.В. Аналіз та моделі самоподібного трафіка // Авиационно-космическая техника и технология. – 2006. – № 9 (35). – С. 173-180.
- 8 Кучук Г.А. Управління трафіком мультисервісної розподіленої телекомунікаційної мережі // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2007. – Вип. 2.– С. 18-27.
- 9 Можжаєв О.О. Моделирование трафіка телекомунікаційних мереж на базі масштабної інваріантності // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – Х.: ХУ ПС, 2006. – Вип. 6(12). – С. 79-82.
10. Можжаев А.А. Оценка достоверности определения параметров телекоммуникационного трафика // Системи обробки інформації. – Х.: ХУ ПС. – 2006. – Вип. 9(58). – С. 53-55.
11. Можжаєв О.О., Подорожняк А.О., Стасєв С.Ю. // Оцінка параметрів негаусових стохастичних процесів Системи озброєння і військова техніка. – 2006. – Вип. 4(8). – С. 74-77.
12. Кучук Г.А., Можжаєв О.О. Прогнозирование трафика для управления перегрузками интегрированной телекоммуникационной сети // Радиоэлектронні і комп'ютерні системи. – 2007. – № 8(27). – С. 261-271.
13. Van Jacobson. Congestion Avoidance and Control // Proceedings of ACM SIGCOMM'88, 18(4), Aug 1988. – P. 314-329.

Надійшла до редколегії 29.03.2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. О.І. Стрелков, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.