УДК 681.324:621.325

А.А. Коваленко

Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків

ОГЛЯД МОДЕЛЕЙ ТРАФІКА, ЯКІ ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ ПІД ЧАС АНАЛІЗУ ЧЕРГ

Проведений огляд основних моделей сучасного трафіка, які можливо використовувати під час аналізу черг. Наведені результати дослідження різноманітних моделей трафіка, включаючи фрактальний броунівський рух, фрактальний гаусівський шум, незалежну гаусівську модель області вейвлету та мультифрактальну вейвлет-модель. Також проведено порівняння різних моделей.

Ключові слова :*протокол TCP, трафік, фрактальність, масштабна інваріантність, математичне очікування, модель, телекомунікаційна мережа.*

Вступ

Постановка задачі та аналіз літератури. Особливостями сучасного трафіка як цивільних, так і мереж спеціального призначення, є наявність післядії та масштабна інваріантність статистичних характеристик [1, 4 – 7].

Такий характер трафіка може призвести до нерівномірності завантаження існуючих каналів мереж передавання даних, яка характеризується або перевантаженням або недостатнім використанням виділених каналів.

Черга маршрутізатора розглядається як черга безмежної довжини з постійним коефіцієнтом обслуговування для дослідження ймовірності того, що довжина черги Q перевищить порогове значення b, $P\{Q > b\}$.

До теперішнього часу існуючі підходи та моделі не дозволяли проводити завжди адекватне прогнозування ситуації, коли $P\{Q > b\}$.

Таким чином, розробка нового підходу до аналізу процесу постановки даних у чергу, який реалізує можливість прогнозування трафікового процесу, виходячи безпосередньо із виміряних статистичних характеристик трафіка, є **актуальною**.

Метою даної статті є проведення огляду основних моделей сучасного трафіка, які можливо використовувати при вивченні організації черг та прогнозуванні трафікового процесу сучасних високошвидкісних мереж передачі даних.

Результати теоретичних досліджень

Розглянуті чотири основних моделі трафіка, які досить добре описують властивості довгочасовоъ залежносты реального трафіка, але вони мають відмінності у здатності моделювати інші властивості трафіка.

Фрактальний броунівський рух. Фрактальний броунівський рух (ФБД) це однозначний гаусівський процес зі стійкими інкрементами та наступною властивістю масштабування для усіх $a > 0, t \in R$, $0 < H < 1$:

$$B_{at} \overset{d}{=} a^H B_t . \qquad (1)$$

Символи “$\overset{d}{=}$”, “var”, E та “cov” означають рівність розподілення, відхилення, математичного очікування та коваріантності відповідно.

Фрактальний гаусівський шум. Фрактальний гаусівський шум (ФГШ) – це процес збільшення ФБД. Оскільки ФГШ є стійким, ФБД само по собі нестійке за визначенням. Якщо позначити стохастичний диференціал B_t як $\Delta_t B$, тоді можна записати ФГШ за допомогою наступного виразу:

$$G_t[\tau] := K_t^{\{\Delta_t B\}}[\tau] = B_t - B_{t-\tau} . \qquad (2)$$

Оскільки складно точно визначити $\Delta_t B$, його множина $K_t^{\{\Delta_t B\}}[\tau]$ добре відома. Часто цікавість викликають лише часові серії $\{G_{i\tau'}[\tau']\}_{i \in Z}$ з постійною часовою затримкою τ'. Згідно (1) та (2) отримаємо наступний вираз

$$K_t^{\{\Delta_t B\}}[t] = B_t \overset{d}{=} t^H B_1 \qquad (3)$$

отже

$$\operatorname{var}\left(G_{i\tau'}[\tau']\right) = \operatorname{var}\left(K^{\{\Delta_t B\}}[\tau']\right) = \sigma^2 (\tau')^{2H} , \qquad (4)$$

де $\sigma^2 = \operatorname{var}(B_1)$. Коли $\frac{1}{2} < H < 1$, ФГШ є ДВЗ.

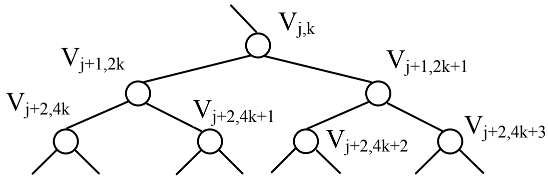

Рис. 1. Представлення багатошкального дерева трафіка

Незалежна гаусівська модель області вейвлету (НГМОВ). НГМОВ є гаусівською моделлю трафіка, яка спроможна апроксимувати ФБД та ФГШ поряд із процесами з більш загальним масштабуванням, ніж у виразів (1) та (4). Вона використовує багатошкальне дерево для моделювання трафіка поза часовим інтервалом $\left[0,T\right]$ [8]. Вузли $V_{j,k}$ дерева відповідають загальному трафіка на часовому інтервалі $\left[k2^{-j}T,\left(k+1\right)2^{-j}T\right], k=0,1,...,2^{j}-1$ (рис. 1).

Вузли на кожному горизонтальному рівні дерева відповідають сукупності процесу в блоках, які не перекриваються, розмірності два з нижчими рівнями, які відповідають меншим розмірам блоків. Кожний вузол є сумою його двох потомствених вузлів. Починаючи з вузла $V_{j,k}$, НГМОВ моделює вузли $V_{j+1,2k}$ з використанням незалежних адитивних випадкових $Z_{j,k}$ наступним чином:

$$\begin{aligned} V_{j+1,2k} &= \left(V_{j,k}+Z_{j,k}\right)/2 \\ V_{j+1,2k+1} &= \left(V_{j,k}+Z_{j,k}\right)/2. \end{aligned} \tag{5}$$

На практиці використовується НГМОВ дерево кінцевого розміру n для отримання дискретного у часі процесу $V_{n,k}$. Значення $Z_{j,k}$ має таку ж дисперсію всередині кожної шкали j, отже, забезпечуючи те, що $V_{n,k}$ є стаціонарним процесом першого порядку. Корні $V_{0,0}$ та $Z_{j,k}$ є гаусіанівськими, що забезпечує те, що усі три вузла є гаусіанівськими.

Згладжування моделі трафіка припускає вибір її параметрів або для співпадіння ключових статистичних характеристик трафіка, що спостерігається, або для гарантії того, що модель має певні передумовлені статистичні властивості. Згладжування НГМОВ передбачає вибір її параметрів таким чином, щоб забезпечувалася необхідна прогресія дисперсії $\mathrm{var}\left(V_{j,k}\right)$. НГМОВ може надавати гаусівську апроксимацію для любого стаціонарного дискретного у часі процесу X, тобто, НГМОВ може бути використана для отримання результату, що описується наступним виразом

$$\mathrm{var}\left(V_{n-j,k}\right)=\mathrm{var}\left(K^{\{X\}}\left[2^{j}\right]\right). \tag{6}$$

Мультифрактальна вейвлет-модель (МФВМ). МФВМ є негаусівською моделлю, що основана на багатошкальному дереві, яке, як і МФВМ, представляє більш загальне масштабування дисперсії трьох вузлів, ніж ФГШ [9]. На відміну від МФВМ це забезпечує позитивність на усіх масштабах часу, важлива властивість реального трафіка, що часто погано апроксимується гаусівськими моделями. Приймаючи $V_{0,0}\ge 0$, МФВМ використовує незалежні мультиплікативні значення $U_{j,k}\in\left[0,1\right]$ для моделювання двох потомків вузла $V_{j,k}$ за допомогою наступних виразів:

$$\begin{aligned} V_{j+1,2k} &:= V_{j,k}U_{j,k} \\ V_{j+1,2k+1} &:= V_{j,k}\left(1-U_{j,k}\right). \end{aligned} \tag{7}$$

Оскільки добуток незалежних випадкових змінних сходиться до логонормального розподілення, згідно з основною граничною теоремою, вузли $V_{j,k}$ стають приблизно логонормальними при збільшенні значення j.

Згідно [9], $U_{j,k}$ та $V_{0,0}$ моделюються як симетричні бета випадкові змінні. Отже, третій вузол $V_{j,k}$ є добутком декількох незалежних бета випадкових змінних. Використовуючи результати із [10], розподілення $V_{j,k}$ апроксимується як інше бета розподілення з відомими параметрами для обчислення різноманітних апроксимацій процесу організації черг для МФВМ.

Згладжування МФВМ включає вибір її параметрів для отримання необхідної прогресії дисперсії $\mathrm{var}\left(V_{j,k}\right)$. МФВМ може моделювати будь-який стаціонарний дискретний у часі процес X с позитивним коефіцієнтом автокореляції (див. вираз (6)).

Моделі НГМОВ та МФВМ є стаціонарними моделями першого порядку, що видно із рис. 1. Спостерігається, що вузли $V_{j+2,4k}$ та $V_{j+2,4k+1}$ мають один батьківський вузол, чого немає у вузлів $V_{j+2,4k+1}$ та $V_{j+2,4k+2}$. Отже, кореляції між вузлом $V_{j+2,4k+1}$ ї його двома сусідами, $V_{j+2,4k}$ та $V_{j+2,4k+2}$, відрізняються. Обидві моделі, однак, мають усереднену у часі кореляційну структуру, яка близька до стаціонарного процесу X, який вони моделюють [9].

Аналіз організації черг для ФБД, ФГШ, НГМОВ та МФВМ. Початковий розмір черги встановлюється в нуль для задовільнення збереження достатньої умови для виразу (2), який наведено в [11].

У даній статті усі результати зі входом ФБД відповідають безперервній у часі черзі з коефіцієнтом обслуговування c, початковим значенням $Q_0:=0$ та $K_t\left[\tau\right]=K_t^{\{\Delta_t B+m\}}\left[\tau\right]=B_t-B_{t-\tau}+m\tau$. Отримаємо наступний вираз:

$$\begin{aligned} P\left\{Q_t>b\right\} &= P\left\{\sup_{0\le\tau\le t}\left(K_t\left[\tau\right]-c\tau\right)>b\right\} \\ &\xrightarrow{t\to\infty} P\left\{\sup_{\tau\ge 0}\left(K_0\left[\tau\right]-c\tau\right)>b\right\} \\ &=: P\left\{Q_\infty>b\right\}, \end{aligned} \tag{8}$$

де границя зберігається завдяки стаціонарності інкрементів ФБД. Припустимо, що $\hat{c}:=c-m>0$ та розглянемо кількість $P\left\{Q_\infty>b\right\}$ як визначено у (8).

Для трафіка ФГШ, НГМОВ та МФВМ розглянемо дискретні у часі черги, які встановлені у $Q_0:=0$ та розвиваються у відповідності з

$$Q_{t+1}=\max\left(Q_t+X_t-\overline{c},0\right),\ t\in Z_{+}. \tag{9}$$

Визначаючи $K_t\left[\tau\right]:=\sum_{k=t-\tau}^{t-1}X_k$ для

$\tau = 1, 2, ..., t$, $t = 1, 2, ..., \infty$ та $K_t[0] := 0$, отримаємо

$$Q_t := \max_{\tau=0,1,...,t} \left(K_t[\tau] - \overline{c}\tau\right). \qquad (10)$$

Для ФГШ встановлюємо значення $\overline{c} = c\tau'$ та $X_t = G_{t\tau'}[\tau']$ при $t = 0,1,...,\infty$. Розглянемо кількість $P\{Q_\infty > b\}$, яка визначена згідно з (8) з тією лише різницею, що t та τ приймають цілі значення.

Для НГМОВ та МФВМ розглянемо Q_t тільки для значень $t = 0,1,...,2^n - 1$ при $\overline{c} = \tilde{c}^{(n)} := cT2^{-n}$, де n є глибиною багатошкального дерева. Тут $X_t = V_{n,t}$. Припустимо, що

$$E\left(V_{n,k}\right) < \tilde{c}^{(n)} \qquad (11)$$

та розглянемо кількість $P\{Q_t > b\}$, яка змінюється у часі.

Для моделей ФГШ, НГМОВ та МФВМ, значення $K_t[\tau]$ визначено тільки для $\tau = 0,1,...,t$. Для цих моделей визначимо $M_t^{[\theta]}(b)$, $P_t^{[\theta]}(b)$ та $s_t^{[\theta]}(b)$ згідно (8), (12) та (13), за виключенням заміни θ на $\theta \cap \{0,1,...,t\}$.

Висновки

У даній статті проведено аналіз моделей мережевого трафіка, який використовується при аналізі черг. Однак не був розглянутий випадок черг кінцевої довжини, у яких виникають відкидання пакетів. Отже, наведені результати є більш корисними для прогнозування затримок постановки пакетів до черги, ніж втрат пакетів.

Наведений аналіз дійсний для розімкнутих моделей трафіка, тоді як реальний трафік мережі Інтернет переважно складається з замкнутого TCP трафіка, який реагує на зміни умов в мережі іншим чином [12]. Можливі застосування розімкнутих моделей існують для ініціалізації магістралей в Інтернет (для отримання низьких затримок та втрат) [4] та звичайно в мережах з переважаючим розімкнутим трафіком.

Список літератури

1. Crovella M. Self-similarity in World Wide Web traffic: evidence and possible causes / M. Crovella, A. Bestavros // IEEE/ACM Transactions on Networking. – 1997. – Vol. 5. – P. 835-846.
2. Erramilli A., O. Experimental Queuing Analysis with Long-Range Dependent Traffic / A. Erramilli, O. Narayan, and W. Willinger // IEEE/ACM Transactions on Networking. – 1996. – № 7. – С. 24-27.
3. WillingerW. Self-Similarity Through High-Variability: Statistical Analysis of Ethernet LAN Traffic at the Source Level / W. Willinger, M.S. Taqqu, R. Sherman, and D.V. Wilson // ACM SIGCOMM'91. – 1001. – P. 149-157.
4. Leland W. On the self-similar nature of IP-trafic / W. Leland, M. Taqqu, W. Willinger // IEEE/ACM Transactions on Networking. – 1997. – № 3. – P. 423-431.
5. Фрактальный анализ процессов, структур и сигналов: Коллективная монография // Г.А. Кучук, А.А. Можаев, Р.Э. Пащенко, К.М. Руккас – Х.: ЭкоПерспектива, 2006. – 360 с.
6. Воробьев О.В. Моделювання самоподібного трафіка синтезом ансамблю стохастичних квазіперіодичних джерел та ON/OFF модели / О.В. Воробьев // Системи озброєння і військова техніка. – 2006. – № 3 (6). – С. 97-105.
7. Кучук Г.А. Аналіз та моделі самоподібного трафіка / Г.А. Кучук, О.О. Можаєв, О.В. Воробйов // Авиационно-космическая техника и технология. – 2006. – № 9(35). – С. 173-180.
8. S. Ma and C. Ji, Modeling video traffic in the wavelet domain // IEEE INFOCOM, Mar. 1998. – P. 201-208.
9. R. Riedi A multifractal wavelet model with application to network traffic, IEEE Trans. Inf. Theory / R. Riedi, M.S. Crouse, V. Ribeiro, and R.G. Baraniuk. – Apr. 1999. – Vol. 45, no. 3. – P. 992–1018.
10. D. Fan, The distribution of the product of independent beta variables, Commun. Statist.-Theory Meth. – 1991. – Vol. 20, no. 12. – P. 4043–4052.
12. Joo Y. TCP/IP traffic dynamics and network performance: A lesson in workload modeling, flow control, and trace-driven simulations / Y. Joo, V. Ribeiro, A. Feldmann, A. C. Gilbert, W. Willinger // Comput. Commun. Rev.– 2001. – Vol. 31, no. 2. – P. 25-37.

Надійшла до редколегії 30.11.2008

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

ОБЗОР МОДЕЛЕЙ ТРАФИКА, КОТОРЫЕ ИСПОЛЬЗУЮТСЯ ВО ВРЕМЯ АНАЛИЗА ОЧЕРЕДЕЙ

А.А. Коваленко

Проведен обзор основных моделей современного трафика, которые можно использовать во время анализа очередей. Приведены результаты исследования разнообразных моделей трафика, включая фрактальный Броуновский движение, фрактальный гауссовский шум, независимую гауссовскую модель области вейвлета и мультифрактальную вейвлет-модель. Также проведено сравнение разных моделей.

Ключевые слова: *протокол TCP, трафик, фрактальность, масштабная инвариантность, математическое ожидание, модель, телекоммуникационная сеть.*

REVIEW OF MODELS OF TRAFFIC, WHICH ARE UTILLIZED DURING QUEUING ANALYSIS

A.A. Kovalenko

The review of basic models of modern traffic, which it is possible to utillize during a queuing analysis, is conducted. The results of research of various models of traffic are resulted, including fractal Brownian motion, fractal Gausovskiy noise, independent Gausovsku model of area of вейвлету and мультифрактальну вейвлет-модель. Comparison of different models is also conducted.

Keywords: *protocol of TSR, traffic, fractal, scale invariance, expected value, model, telecommunication network.*