УДК 621.391, 51-74

Матичин І. І., д.ф.-м.н . *(Інститут кібернетики ім. В. М. Глушкова)*
Онищенко В. В., к.ф.-м.н. *(Державний університет телекомунікацій)*

МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ ТРАФІКУ В ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ ТА МЕРЕЖАХ

Матичин І. І., Онищенко В. В. Моделювання та аналіз трафіку в телекомунікаційних системах та мережах. Розглядаються дві моделі для опису самоподібних процесів: дробовий броунівський рух та ON/OFF-модель. Проаналізовано мережевий трафік, для якого визначено ступінь фрактальності H (показник Херста). Отримано такі результати: часові ряди не підлягають нормальному розподілу; при передачі пакетів даних виконується умова $0 \le H < 0.5$; часовий ряд є "рожевим шумом". Велике практичне значення має питання щодо прогнозування та передбачення станів різкого завантаження мережі та значних втрат пакетів.

***Ключові слова**:* передачі пакетів даних, мережевий трафік, часовий ряд, самоподібність, фрактал, дробовий броунівський рух, ON/OFF-модель, експонента Херста

Матичин И. И., Онищенко В. В. Моделирование и анализ трафика в телекомуникационных системах и сетях. Рассматривается две модели для описания самоподобных процессов: дробное броуновское движение и ON/OFF-модель. Проанализировано сетевой трафик, для которого определена степень фрактальности H (показатель Херста). Получены такие результаты: временные ряды не подлежат нормальному распределению; при передаче пакетов данных выполняется условие $0 \le H < 0.5$; часовой ряд является "розовым шумом". Большое практическое значение имеют вопросы прогнозирования и предвидения состояний резкой загрузки сети и существенных потерь пакетов.

Ключевые слова: передаче пакетов данных, сетевой трафик, временной ряд, самоподобие, фрактал, дробное броуновское движение, ON/OFF-модель, экспонента Херста

Matychyn I. I., Onyshchenko V. V. Modeling and analysis of traffic in telecommunication systems and networks. We consider two models describing self-similar processes: fractional Brownian motion and the ON / OFF-model. Analysis of network traffic to determine the degree of fractality H (Hurst exponent) is carried out. Such results are got: times series are not subject normal distribution; at the transmission of packages a condition $0 \le H < 0.5$ is executed; a times series is "rose noise". A large practical value has a question in relation to prognostication and foresight of the states of sharp load of network and severe losses of packages.

Key words: transmission of data packages, network traffic, times series, self-similarity, fractal, fractional Brownian motion, ON / OFF-model, Hurst exponent

Вступ. Сучасні дослідження трафіка, що передається в телекомунікаційних системах , показують, що його статистичні характеристики відмінні від тих, які прийняті в класичній теорії телетрафіку [1, 2, 3]. Уявлення про те, що об'єднання великого числа потоків від незалежних джерел інформації призводить до отримання процесу, що описує пуасонівський потік, не відповідає дійсності. Отже, використання традиційних методів розрахунку параметрів телекомунікаційних систем та їх ймовірносно-часові характеристики, що базуються на пуасонівських моделях та формулах Ерланга, дають невиправдано оптимістичні результати, що призводять до недооцінки навантаження.

Останні дослідження властивостей інформаційних потоків в мультисервісних телекомунікаційних системах показали, що використання моделей самоподібних процесів (самоподібних потоків) дозволяє більш точно описувати трафік, що передається в даних системах.

Оскільки в пакетному трафіку різних мереж було виявлено властивість самоподібності, виникла проблема побудови моделей, які могли б достатньо точно описати такий трафік та забезпечити збереження переданих даних або застосувати вже відомі моделі для опису подібних трафіків.

Постановка задачі. Характеристики будь-якої технічної системи та ефективність її функціонування закладаються на етапі проектування. Процес проектування телекомунікаційних систем є багатоетапним процесом. Він базується на комплексному застосуванні математичних моделей.

Одним з етапів проектування є параметричний синтез – визначення оптимальних (або допустимих, у випадку неможливості визначити оптимальні) значень параметрів елементів при відомій структурі системи. В якості таких параметрів для телекомунікаційних мереж виступають: пропускна здатність каналів зв'язку, продуктивність комутаційних вузлів (серверів та т.д.), об'єми буферів, що виділяються для обслуговування потоків при їх обробці в вузлах мережі, та інші параметри.

При розв'язанні задач параметричного синтезу в багатьох випадках недостатньо обмежитись лінійними моделями, які не враховують нелінійний характер залежності якості обслуговування потоків від їх інтенсивності.

Властивість самоподібності, що притаманна потокам, що передаються через мережу, має великий вплив на ефективність роботи телекомунікаційної мережі. Особливо важливу роль це відіграє при параметричному синтезі телекомунікаційних систем, що забезпечують передачу мультимедійного трафіку та трафіку реального часу.

Використання для моделювання інформаційних потоків в мультисервісних телекомунікаційних системах моделей самоподібних процесів, з метою параметричного синтезу, висуває необхідність розв'язання наступних проблем: пересвідчитись, що мережевий трафік має самоподібну структуру та вибрати математичну модель для опису трафіку телекомунікаційної мережі, зробити аналіз.

Самоподібні (фрактальні) процеси. Поняття самоподібності тісно пов'язане з поняттям фрактала. Визначення фрактала, що дав Б.Мандельброт в роботі [4], наступне: «Фракталом називається структура, що складається з частин, які подібні до цілого». Фрактальний об'єкт, з математичної точки зору, має дробову розмірність, яка визначається у вигляді

$$d = {\log N} \Big/ {\log \frac{1}{r}},$$

де N – кількість рівних частин на які треба розбити об'єкт, а кожна частина буде зменшеною копією цілого в $\frac{1}{r}$.

Дамо визначення та розглянемо основні властивості самоподібних процесів.

Процес $\zeta(t)$ є точно самоподібним другого порядку з параметром Херста H $(0,5 < H < 1)$, якщо

$$R(k) = \frac{\sigma^2}{2}\left[(k+1)^{2H} - 2k^{2H} + (k-1)^{2H}\right], \quad \forall k \geq 1, \tag{1}$$

де $R(k), \sigma^2$ – кореляційна функція та дисперсія процесу $\zeta(t)$, відповідно.

Процес $\zeta(t)$ є асимптотично самоподібним другого порядку з параметром Херста H $(0,5 < H < 1)$, якщо

$$\lim_{m\to\infty} R^{(m)}(k) = \frac{\sigma^2}{2}\left[(k+1)^{2H} - 2k^{2H} + (k-1)^{2H}\right], \forall k \geq 1, \quad \textbf{(2)}$$

де $R^{(m)}(k)$ – кореляційна функція агрегованого процесу $\zeta^{(m)}(t)$.

Самоподібність другого порядку означає, що кореляційна структура точно (умова (1)) або асимптотично (умова (2)) зберігається агрегуванні часового ряду. Самоподібність другого порядку (точна або асимптотична) є основною структурою для моделювання трафіку в мережі.

Моделювання трафіку. З роботи [5] відомо, що найбільш широко застосовуються три види розподілу: Парето, Вейбулла, логнормальне.

Розподіл Парето використовується для моделювання інтервалів між запитами до web-ресурсів, розмірів файлів, що передаються, трафіка VoIP.

Розподіл Вейбулла застосовується для моделювання процесів надходження протокольних блоків FTP.

Логнормальний розподіл – сама рання модель самоподібного трафіка. Використовується для моделювання інтервалів надходження пакетів в локальній обчислювальній мережі, часу між викликами в Coll-центрах, розмірів файлів, що передаються.

Слід зазначити, що при агрегуванні потоків від декількох джерел, якщо хоча б один з них має властивість самоподібності, то властивість само подібності буде мати і результуючий сумарний потік [6]. Об’єднання потоків від джерел, що генерують трафік, призводить до самоподібного мережевого трафіка, який прямує до трафіка, що описується моделлю дробового броунівського руху.

В роботі [7, 8] використана модель дробового броунівського руху, як модель самоподібного процесу.

Процес дробового броунівського руху — це гаусівський процес $B_H(t)$ з нульовим середнім, дисперсія якого зростає відповідно до деякої степеневої функції. Так, Б.Б. Мандельброт та Дж. Ван Несс ввели дробовий броунівський рух, як модель для процесів, дисперсія яких зростає як t^{2H}:

$$\left(DB_H(t)\right)^{1/2} \sim t^H,$$

де параметр H $(0 < H < 1)$ має назву експоненти Херста (Hurst exponent). Експонента Херста характеризує “зазубленість” траєкторій випадкового процесу: чим більшим є значення H, тим більш гладкою є результуюча траєкторія.

При цьому, кореляційна функція дробового броунівського руху задається виразом

$$M[B_H(t)B_H(s)] = \frac{1}{2}\left(|t|^{2H} + |s|^{2H} - |t-s|^{2H}\right). \quad \textbf{(3)}$$

Значенню $H = \frac{1}{2}$ відповідає звичайний броунівський рух (вінерівський процес) – процес з незалежними приростами. Якщо $H \neq \frac{1}{2}$, то прирости процесу $B_H(t)$ на часових інтервалах, що не перетинаються, є стохастично залежними, причому значенням $H > \frac{1}{2}$ відповідає додатна кореляція приростів, а значенням $H < \frac{1}{2}$ – від'ємна. Послідовні прирости дробового броунівського руху називають дробовим гаусівським шумом:

$$G_H(t) = B_H(t+1) - B_H(t).$$

Важливою для застосування у фрактальній модуляції є властивість самоподібності дробового броунівського руху:

$$M[B_H(at)] = |a|^H M[B_H(t)].$$

Ця властивість обумовлює фрактальну структуру траєкторій дробового броунівського руху і пов'язана з тим фактом, що кореляційна функція (3) є однорідною порядку $2H$. Дробовий броунівський рух є єдиним самоподібним гаусівським процесом. З ймовірністю 1, траєкторії дробового броунівського руху $B_H(t)$ мають фрактальну вимірність, яка дорівнює

$$D = 2 - H,$$

як у сенсі Хаусдорфа–Безиковича, так і у сенсі Мінковського.

Найбільш поширене означення дробового броунівського руху [8, 9] використовує поняття дробового інтеграла, а саме:

$$B_H(t) = \int_{-\infty}^{\infty} [K_H(t-s) - K_H(-s)]dB(s),$$

де $B(s)$ – вінерівський процес,

$$K_H(t) = \begin{cases} \dfrac{t^{H-\frac{1}{2}}}{\Gamma\left(H+\frac{1}{2}\right)}, & t \geq 0 \\ 0, & t < 0 \end{cases}.$$

Це означення являє собою регуляризацію (збіжну різницю двох розбіжних інтегралів) інтеграла дробового порядку $H + \frac{1}{2}$ від "білого шуму":

$$\frac{1}{\Gamma\left(H+\frac{1}{2}\right)} \int_0^t |t-s|^{H-1/2} dB(s).$$

ON/OFF-модель використовується для пояснення фізичних причин самоподібних явищ в сучасних телекомунікаційних мережах. Припускають, що самоподібні характеристики, слідують з щільності розподілу з важким хвостом в послідовності ON/OFF-станів. Традиційна ON/OFF-модель генерує процес, який є майже гаусівським процесом, що отриманий від 2400 пар ON/OFF-джерел.

Джерело трафіка, що описується даною моделлю, являє собою джерело, яке має два стани: активний (On-період). В активному стані він видає потік з постійною швидкістю λ_{On}. В пасивному стані трафік не передається (Рис.1).

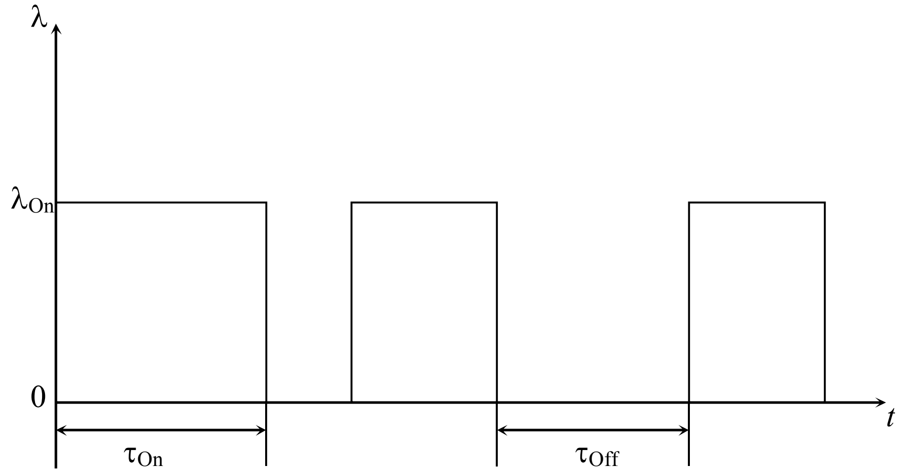

Рис.1 Модель джерела трафіка

Тривалість періодів On та Off є випадковими величинами. Довжину інтервалу активності τ_{On} описується функцією щільності ймовірностей $p_{On}(\tau)$, функцією розподілу

$$P_{On}(\tau) = \int_0^{\tau} p_{On}(t)\,dt .$$

Аналогічно задається довжина інтервалу пасивності. Зауважимо, що функція розподілу $P_{On}(\tau)$ та $P_{Off}(\tau)$ можуть бути різними для тривалості активного та пасивного періоду. При цьому швидкість потоку, що виробляється джерелом в активному стані дорівнює пропускній здатності вхідного каналу зв'язку.

Описані моделі в подальшому будуть використовуватись для визначення параметрів потоків, що передаються в мультисервісній телекомунікаційній системі, при розв'язанні задач параметричного синтезу та аналізу якості обслуговування.

Визначення ступеня фрактальності. Пересвідчимось, що мережевий трафік має самоподібну структуру. Для вивчення обрано три реалізації мережевого трафіка [10], отримані в 2004 році в університеті міста Неаполя (Італія). Згідно з ліцензією, ці дані знаходяться у вільному доступі для аналізу. Виміри кількості пакетів проводилися кожні 2 секунди протягом двох годин. На наступних графіках (рис. 2...4) показано три ряди даних, що відносяться до вхідного трафіку мережі університету Неаполя.

За припущення, що одержані дані являють собою реалізації дробового броунівського руху, знайдемо відповідні значення експоненти Херста. Для цього скористаємось оцінками, що базуються на використанні дискретної похідної другого порядку, та її вейвлет-модифікації, за допомогою системи MATLAB. В результаті одержимо наступні значення:

1 вибірка: 0.2538 0.2491
2 вибірка: 0.2741 0.2691
3 вибірка: 0.3356 0.3061

Таким чином, одержані оцінки свідчать, що в усіх трьох випадках експонента Херста не перевищує ½.

Оскільки $0 \le H < 0.5$ означає "рожевий шум" або антиперсистентність, то всі три вибірки змінюють напрям частіше, ніж ряд випадкових незалежних величин.

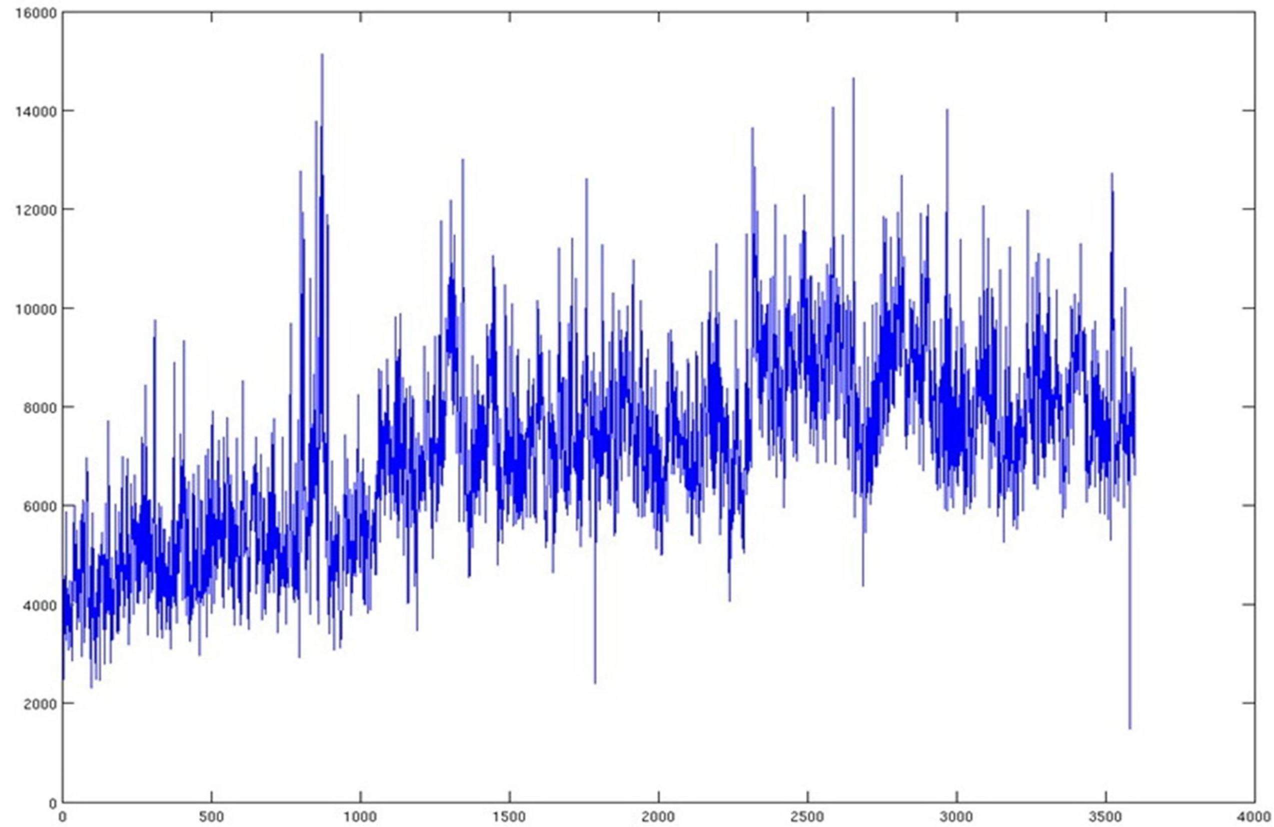

Рис. 2. Перша вибірка

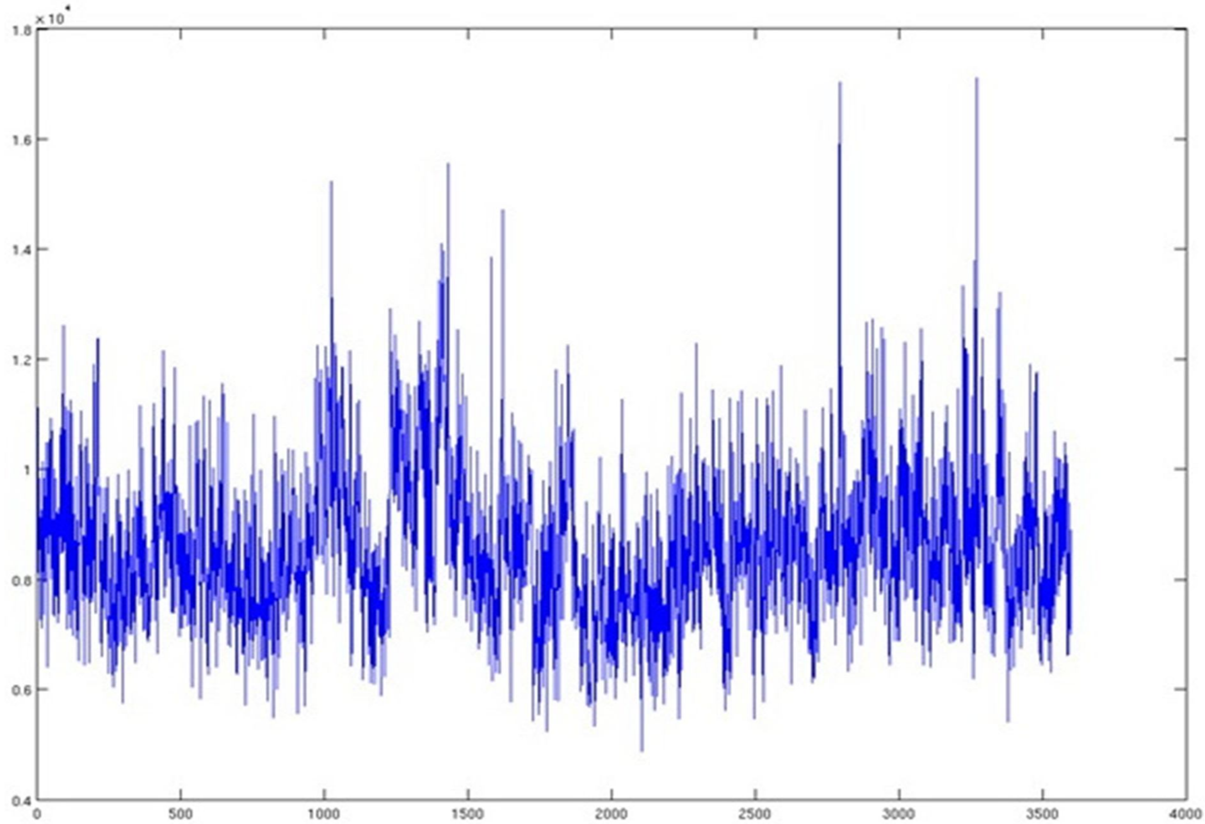

Рис. 3. Друга вибірка

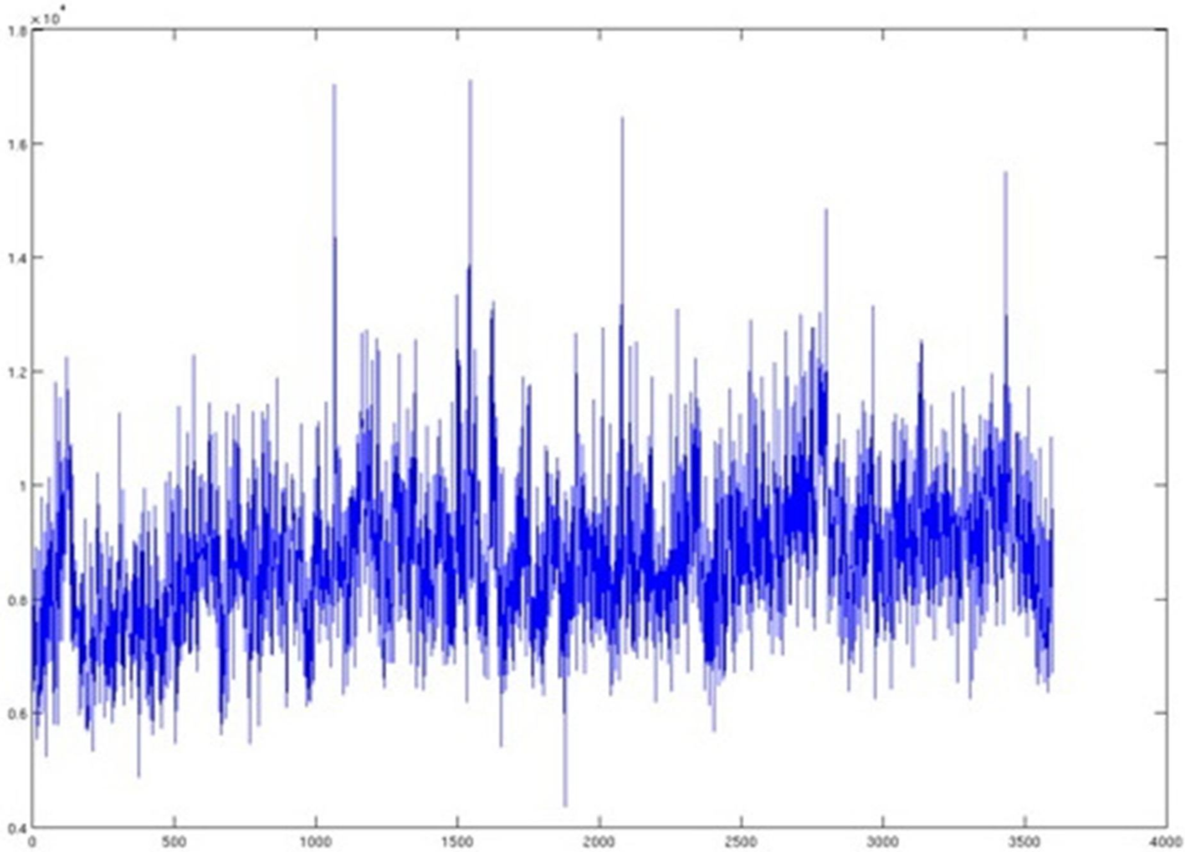

Рис. 4. Третя вибірка

Висновок. Ситуація, що склалась в сучасних комп’ютерних мережах: наявність великої кількості мережевих маршрутів на яких періодично виникають різкі коливання затримки в передачі даних та великі втрати пакетів, поява нових властивостей мережевого трафіку, необхідність забезпечення високої якості обслуговування додатків, роблять актуальним моделювання та аналіз мережевого трафіку.

Велика кількість робіт, що присвячена аналізу мереж, базується на використанні теорії черг. Але сучасний трафік має особливості, які ускладнюють її застосування.

Для процесів передачі даних пакетним трафіком, характерна виявлена на практиці властивість масштабної інваріантної статистичної характеристики, що пов’язана з особливим класом фізичних процесів – фрактальними процесами.

У зв’язку з цією особливістю сітьових процесів особливу актуальність набуває розробка методів дослідження фрактальності та врахування її при передачі пакетного трафіку.

В даній роботі розглянуті дві моделі для опису самоподібних процесів: дробовий броунівський рух та ON/OFF-модель. Вони вдало описують деякі види пакетних трафіків. Але, не зважаючи на подібність трафіка різних видів мереж з пакетною комутацією, є відмінності, які обумовлюють застосування тої чи іншої моделі. Крім того є мережі, для яких аналогічне моделювання ще не проводилось. Тому просто застосовувати запропоновані моделі недостатньо. Необхідно визначити показники, які відображають різні потоки інформації в цих мережах та спробувати врахувати їх в узагальнених моделях, тобто в подальших дослідженнях може отримати подальший розвиток модифікована

ON/OFF-модель. Велике практичне значення має питання щодо прогнозування та передбачення станів різкого завантаження мережі та великі втрати пакетів.

Крім того, за даними [10], знайдено показник Херста та отримано такі результати: часові ряди не підлягають нормальному розподілу, при передачі пакетів даних виконується умова $0 \le H < 0.5$, часовий ряд є “рожевим шумом”.

Робота є першим етапом до розробки методу моделювання за допомогою ON/OFF-моделі за різними законами розподілу та їх комбінаціями, у якості навантаження на систему активного управління чергами за допомогою системи MATLAB.

Література

1. Leland W.E. On the Self-Similar Nature of Ethernet Traffic(Extended Version) / W.E.Leland, M.S.Taqqu, W.Willinger, D.V.Wilson // IEEE/ACM Trans, on Networking. - 1994.- Vol.2, Issue 1.-P.1-15.

2. Paxson V. Wide-Area Traffic: The Failure of Poisson Modeling / V. Paxson, S.Floyd // Proc. ACM Sigcomm, London, UK. – 1994. – P. 257–268.

3. Петров В.В. Статистический анализ сетевого трафика / В.В. Петров, Е.А. Богатырев // Радиоэлектронника, электротехника и енергетика: десятая международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов, 2-3 матра 2004 г.:тез.докл. – М:Издательство МЭИ. – 2004. – Т. 1. – С. 66–75.

4. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы. – М:Институт компьютерных исследований. – 2002. – 656 с.

5. Симонина О.А. Характеристики трафика в сетях IP / О.А. Симонина, Г.Г. Яновский //Труды учебных заведений связи. – 2004. – №177– С.8-14.

6. Taqqu M.S. Proof of a Fundamental Result in Self-Similar Traffic Modeling / M.S. Taqqu, W.Willinger, R.Sherman // SIGCOMM Comput. Commun. Rev. – 1997. – Vol.27,Issue 2.—P.5-23.

7. Norros I. A Storage Model with Self-Similar Input // Queueing Systems. – 1994. – Vol.16, No 3-4 2.—P.387-396.

8. Матичин І. І. Використання фрактальної модуляції на основі дробового броунівського руху в комунікаційних системах / І. І. Матичин, В. В. Онищенко // Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв’язку. – 2013. – №4(28). – С. 11-16

9. Leland W. On the Self-Similar nature of Ethernet Traffic (Extended Version) / Leland W., Taqqu M., Willinger W., and Wilson D.//IEEE/ACM Transaction on Networking. – 1994. – Vol.2. – No.1.

10. Network tools and traffic traces [Електронний ресурс], 2004 // – Режим доступу: http://www.grid.unina.it/Traffic/Traces/ttraces.php