4. ВИСНОВКИ

На основі тензорної моделі запропоновано якісно новий підхід до дослідження мультисервісних мереж. Для кожного типу вузла на основі теорії масового обслуговування проведено оцінку середньої кількості пакетів у черзі та розглянуто нижню границю пропускної здатності даних вузлів.

Детально представлено пошук можливого маршруту передачі пакету в телекомунікаційній мережі враховуючи час затримки у вузлі та гілках. Значна увага приділена часу можливого очікування для різних систем масового обслуговування до яких можуть відноситись різні вузли.

Запропоновано використання незвідних представлень для пошуку оптимального маршруту в телекомунікаційній мережі з використанням багатомірної цільової функції

1. Соколов Н.А. Використання ступінчастих функцій для аналізу однолінійних систем масового обслуговування з очікуванням. // Міжнародний семінар з теорії телетрафіку і комп'ютерного моделювання, Болгарія, Софія, 1988. С.76 – 87. 2. Клейнрок Л. Вычислительные системы с очередями: Пер. с англ. / Под ред. Б.С. Цыбакова. -М.:Мир, 1979. 600 с. 3. Алиев Р.Т. Методы управления трафиком в мультисервисных сетях // Научно-технический вестник СПбГИТМО (ТУ) - 2002.,Вып. 6.С.10–13. 4. Березко М.П., Вишневський В.М., Левнер Е.В. Математические модели исследования алгоритмов маршрутизации в сетях передачи данных// Передачи информации в компьютерных сетях -2001. Т. 1, №2, С.103-125. 5. Схоутен Я. А. Тензорный анализ для физиков: Пер. с англ. - М., 1965. 456 с. 6. Мінаєв Ю. М.,Філімонова О. Ю. Моделювання трафіка комп'ютерних мереж в базисі тензорних отогональних інваріантів// Проблеми інформатизації та управління, -2005.-Т.12 – С. 120-125.

УДК 621.3
© М. Климаш[1], О. Лаврів[1], Б. Бугиль[1], 2010

ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ САМОПОДІБНОСТІ ТРАФІКУ І ВПЛИВУ ЇЇ СТУПЕНЮ НА ЯКІСТЬ ОБСЛУГОВУВАННЯ

Подано аналіз особливостей трафіку мереж високошвидкісної передачі даних. Проведено дослідження властивостей самоподібності трафіку на основі генерації броунівських послідовностей з визначеним параметром ступеню самоподібності.

The specifics of traffic of high-speed data transferring network are analyzed. Proposed is a research of self-similar properties of the traffic based on generation of Brownian motion sequences with pre-defined self-similar parameter degree.

1. ВСТУП

Постановка завдання і його розв’язок обумовлені тим, що існуючі і використовувані моделі процесів у високошвидкісних мережах не відповідають реальним характеристикам потоків інформації. Використання теорії самоподібних процесів дозволило вирішити цю проблему і створити характерні математичні моделі, що враховують особливості високошвидкісних мереж зв'язку. Розвиток мереж зв'язку, а також успіхи нових мережевих технологій і додатків відновили інтерес до вивчення трафіку сучасних мереж, що генерується реальними службами і додатками. Головною спонукальною причиною цього інтересу послужило бажання перевірити висновки, зроблені на основі розрахунків з використанням традиційних моделей трафіку з характеристиками реальних потоків трафіку. Розрахунки, що базуються на традиційних уявленнях про те, що мультиплексування великого числа незалежних потоків цифрової передачі приводить до пуассонівського процесу, виявилося причиною грубих помилок при проектуванні комутаторів АТМ першого покоління. Коли такі комутатори з невеликими накопичувачами (10 – 100 комірок) були пущені в експлуатацію, втрати комірок виявилися неприпустимо великими, що змусило конструкторів внести необхідні зміни. Високоякісні вимірювання трафіку з високим розширенням виявили, що фактичне навантаження в досліджених мережах істотно відрізняється як від класичних уявлень (телефонний трафік), так і від нових моделей (пакетний трафік), що розглядаються в

[1] Національний університет „Львівська політехніка”

літературі. Характерна особливість навантаження швидкодіючих цифрових мереж – її пачковий характер, причому пачки (скупченості) з'являються в різних масштабах часу, і це утрудняє визначення довжин пачок: у різних шкалах часу тривалість пачки може змінюватися в межах від мілісекунд до хвилин і годин залежно від роздільної здатності вимірювальної апаратури. Трафік, який є пачковим на багатьох або всіх масштабах часу може бути описаний статистично, використовуючи поняття самоподібності. Самоподібність – це властивість фракталу – об'єкту, чиє прояв не змінюється, не дивлячись на масштаб, при якому він спостерігався.

2. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

У випадку стохастичного об'єкту, подібного до часових рядів, самоподібність використовується в статистичному сенсі: статистичні характеристики пакетного навантаження мають структурну схожість при його вимірюванні в різних масштабах часу. Формально в рамках часових рядів і супроводжуючих їх статистичних процедур самоподібність може бути описано наступним чином. Нехай X=(Xt, t=1,2,3.) – стаціонарний випадковий процес з нульовим середнім і функцією автокореляції r(k), k>0. Для кожного m=1, 2, 3. може бути визначена нова стаціонарна послідовність випадкових величин

$$X(m)=(Xk(m),\ k=1,2,3.), \tag{1}$$

яка виходить шляхом усереднювання первинної послідовності X по непересічних блоках розміру m. Інакше кажучи, для кожного m (m=1 2, 3.) випадкова величина X(m) задається у вигляді

$$Xk(m)=(1/m)\ (Xkm\text{-}m+1+\ldots+Xkm),\ k\geq 1. \tag{2}$$

Процес називається самоподібним з параметром H (H-самоподібним) якщо для всіх додатніх m X(m) має такий ж розподіл, як X зі зміною масштабу в mH, тобто

$$X_t \overset{d}{=} m^{-H} \sum_{i=(t-1)m+1}^{t_m} X_i \quad \text{для всіх } m \in N, \tag{3}$$

де $\overset{d}{=}$ означає рівність по розподілу.

Якщо X – H-самоподібний, він має ту ж автокореляційну функцію

$$r(k) = E\left[(X_t - \mu)(X_{t+k} - \mu)\right]\frac{1}{\sigma^2} \tag{4}$$

Аналіз властивостей самоподібності трафіку. Самоподібні процеси можуть показувати довготривалу залежність (Long-range dependence – LRD). Процес з LRD має автокореляційну функцію r(k)~k-β, коли k→∞, де 0<β<1. Таким чином, автокореляційна функція такого процесу відповідає степеневому закону на відміну від експоненційного спаду, що демонструється традиційними моделями трафіку. Спад по степеневому закону повільніший, ніж експоненційний спад, а оскільки β<1, ряд, утворений послідовними значеннями коефіцієнта автокореляції розходиться, тобто $\sum_{k=1}^{\infty} r(k) = \infty$ (ознака довготривалої залежності Кокса). З цієї ситуації виходить ряд висновків:

Дисперсія середнього значення вибірок з таких рядів не зменшується зі збільшенням об'єму вибірки за законом зворотної пропорційності від цього об'єму, що типово для традиційних стаціонарних випадкових процесів. Для самоподібних процесів характерне повільніше зменшення дисперсії згідно із законом $D\left[X^{(m)}\right] \cong c_1 m^{-\beta}$ при $m \to \infty$, $0<\beta<1$, c1 – деяка константа. Ця ознака називається повільним зменшенням дисперсії.

2. Еквівалентне формулювання довготривалої залежності в частотній області (за теоремою Вінера-Хінчина) може бути описане у вигляді відповідної степеневої функції. Спектральна густина самоподібного процесу в околі початку координат має вигляд $f(\lambda) \cong c_2 \lambda^{-\gamma}$ при $\lambda \to \infty$, причому $0<\gamma<1$, де $\lambda=1- \beta$. Ця ознака отримала назву спектру типу 1/f.

Однією з привабливих характеристик використання самоподібних моделей для часових рядів є характеристика ступеня самоподібності яка виражається з використанням тільки одного параметра. По історичних причинах використовуваний параметр називається Херст-параметром. Відкриття Х.Е. Херстом (Hurst) (1951р.) нового статистичного методу (методу нормованого розмаху, або методу R/S) послужило важливим поштовхом для фундаментальних досліджень, направлених на вивчення самоподібних процесів. Як виявив Херст, для багатьох природних процесів нормований розмах R/S дуже добре описується емпіричними співвідношеннями для великих N:

$$R/S=(N/2)H, \tag{5}$$

де R – різниця між максимумом і мінімумом; S – стандартне відхилення тобто корінь квадратний з дисперсії; N – дискретний час; H – параметр Херста. Параметр Херста лежить в межах $0,5 \le H \le 1$, причому H=0,5 відповідає випадку відсутності самоподібності, а H=1 – випадку, що означає детермінований характер процесу. Таким чином, самоподібний процес характеризується значеннями параметра Херста, обмеженими строгою нерівністю $0,5<H<1$. Параметр Херста більш-менш симетрично розподілений навколо середнього значення 0,73 із стандартним відхиленням рівним ≈0,09. Побудувавши графік залежності R/S від N в логарифмічному масштабі по обох шкалах, Херст визначив, що графік R/S залежно від N має нахил, який є оцінкою H. Саме такий метод і покладений в основу сучасного аналізу статистичних даних і визначення параметра Херста. Таким чином, для самоподібних рядів з LRD, 0,5<H<1. Коли H→1 ступінь самоподібності і LRD зростає.

Мандельброт в своїй роботі відзначив, що багато нерівних структур природи, які привертають увагу, у багатьох випадках важкі для документування, проте, Біблія пропонує два виключення. Важко не побачити історію Ноя, як притчу про нерівномірне випадання опадів на Середньому Сході, і історію Йосипа як притчу про схильність сирих і сухих років групуватися в мокрі періоди і періоди засухи. Мандельброт Б.Б. дав цим історіям терміни «ефект Ноя (Noah Effect)» і «ефект Йосипа (Joseph Effect)». Таким чином, як міра ступеня самоподібності часто використовується термін «ефект Йосипа».

У своїй основі поняття "довготривала залежність" і "самоподібність" не еквівалентні. Поняття довготривалої залежності включає поведінку хвоста автокореляційної функції стаціонарних часових рядів, тоді як самоподібність відноситься до поведінки масштабованих процесів з скінченномірними розподілами неперервного або дискретного типу.

Проте Кокс (Cox) ввів термін "строга самоподібність в широкому сенсі" (exactly second-order self-similar) для стаціонарних рядів, чиї агреговані процеси володіють тією невиродженою автокореляційною функцією, як і початковий процес. Процес X називається строго самоподібним в широкому сенсі випадковим процесом з Херст-параметром H=1-(β/2), якщо для всіх

$$m \in N=\{2,3,\dots\} \tag{6}$$

$$\text{var } X(m)=\sigma 2m\text{-}\beta, \tag{7}$$

$$r(m)(k)=r(k),\ k \in N=\{0,1,2,\dots\}. \tag{8}$$

Таке визначення самоподібності не цілком підходить для розширення визначення на асимптотично самоподібні процеси в широкому сенсі.

Моделювання та дослідження часових та енергетичних характеристик самоподібних процесів. Було показано, що X задовольняє (7), якщо і тільки якщо його автокореляційна функція має вигляд

$$r(k)=1/2[(k+1)2\text{-}\beta\text{-}2k2\text{-}\beta+(k\text{-}1)2\text{-}\beta] \overset{\Delta}{=} g(k),\ 0<\beta<1,\ k \in N=\{0,1,2,\dots\}. \tag{9}$$

Його спектральна густина

$$f(\lambda)=c\left|e^{2\pi i\lambda}-1\right|^2 \sum_{t=-\infty}^{\infty} \frac{1}{\left|\lambda+l\right|^{3-\beta}},\ -1/2\le\lambda\le 1/2, \tag{10}$$

де с – постійна, яка задана нормалізацією $\int_{-1/2}^{1/2} f(\lambda) d\lambda = \sigma^2$.

Як випливає з (10), функція f(λ) має сингулярність типу f(λ)~const$|\lambda|^{\beta-1}$ при λ=0. Таким чином, процес X – строго самоподібний в широкому сенсі з параметром H=1-(β/2), 0<β<1, якщо і тільки якщо:

1. його спектральна густина має форму (10), або якщо і тільки якщо

2. він задовольняє умові (7).

Послідовність Гауса з нульовим середнім H-самоподібна, якщо і тільки якщо її автокореляційна функція рівна g(k).

Асимптотична самоподібність в широкому сенсі була визначена відповідним чином. Процес X називається асимптотично самоподібним в широкому сенсі з параметром H=1-(β/2), 0<β<1, якщо всі k ∈ N

$$\lim_{m\to\infty} r^{(m)}(k) = \frac{1}{2}\left[(k+1)^{2-\beta} - 2k^{2-\beta} + (k-1)^{2-\beta}\right] \overset{\Delta}{=} g(k) . \qquad (11)$$

Строго самоподібний процес з параметром H=1-(β/2), 0<β<1, повинен мати r(k)~H(2H-1)k-β, тоді як процес, що є асимптотично самоподібним з параметром H=1-(β/2), 0<β<1, має r(k)~ck-β з деякою постійною с, яка необов'язково рівна H(2H-1). Сенс визначення полягає в тому, що X є асимптотично самоподібним процесом в широкому сенсі, якщо після усереднювання по блоках довжини m і m→∞ він сходиться до строго самоподібного в широкому сенсі процесу. Тут збіжність вже не до початкового процесу X до усереднення, а до строго самоподібного в широкому сенсі процесу.

Наступні твердження є еквівалентними:

а) X є процес асимптотично самоподібний в широкому сенсі, то справедливе (4.6);

б) (Vkm/Vm)~k-β, ціле m→∞, k ∈ N;

в) r(k)~ H(2H-1)L(k) k-β, ціле k→∞ викликає асимптотичну рівність

г) Vm~σ2L(m)m-β, ціле m→∞,

де L(k) – функція, повільно змінна на нескінченності і кожне з (в) і (г) викликає (а) і (б) (тобто вимірювана функція f(x)>0 називається повільно змінною на нескінченності, якщо при кожному u>0 f(ux)→1 при x→∞).

З погляду введених визначень терміни "довготривала залежність" і "самоподібність строга або асимптотична в широкому сенсі" можуть використовуватися у взаємозамінній формі, тому що обидва посилають до поведінки хвоста автокореляційної функції і істотно еквівалентні.

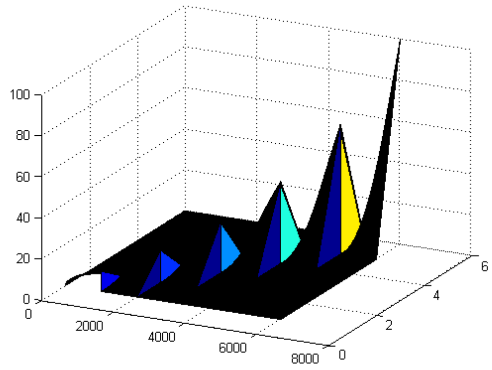

Рис. 1. Залежність нормованого розмаху від параметра Херста і об'єму вибірки дискретного часу. Дослідження проводились за допомогою системи машинних обчислень MATLAB

Наприклад, що стосується гаусівських процесів, то у разі фрактального броунівського руху (fbm), також як і процесу приросту (тобто фрактального гаусівського шуму – fgn) вони розглядаються як самоподібні. В той же час, в першому випадку самоподібність відноситься до поведінки процесів масштабованих з скінченномірними розподілами неперервного часу, а в другому випадку, її розуміють як самоподібність, строгу в широкому сенсі і це є синонімом довготривалої залежності.

Зв'язок між строго самоподібним в широкому сенсі і самоподібним у вузькому сенсі процесом, введеним Колмогоровом, Мандельбротом і ін., аналогічна зв'язку між процесами, стаціонарними в широкому і вузькому сенсі.

Необхідно відзначити, що якщо є два процеси X' і X" такі, що r(k)~c1k-β1, k→∞ для X' і r(k)~c2k-β2, k→∞ для X", де ci і βi (i=1,2) – постійні, 0<ci<∞, 0<βi<1, тоді (X'+X") – процес асимптотично самоподібний в широкому сенсі з параметром H=1-(β/2), де β=min(β1, β2). При цьому обидва процеси X' та X" асимптотично самоподібні, X' з H1=1-(β1/2), 0<β1<1, а X" з H2=1-(β2/2) 0<β2<1. Таким чином, об'єднання потоків асимптотично самоподібних в широкому сенсі, утворює асимптотично самоподібний потік.

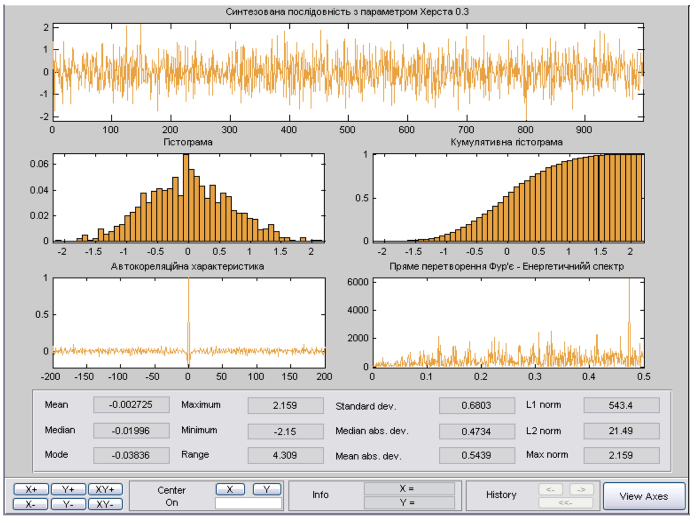

Рис. 2. Дослідження властивостей броунівського ергодичного процесу з параметром Херста 0,3

Нехай процеси X' і X" – строго самоподібні в широкому сенсі, X' з H1, а X" з H2. Якщо H1=H2=H, тоді (X'+X") – строго самоподібний з параметром H. Якщо H1≠H2, тоді (X'+X") – процес, не строго самоподібний в широкому сенсі, але асимптотично самоподібний в широкому сенсі з H=max(H1,H2).

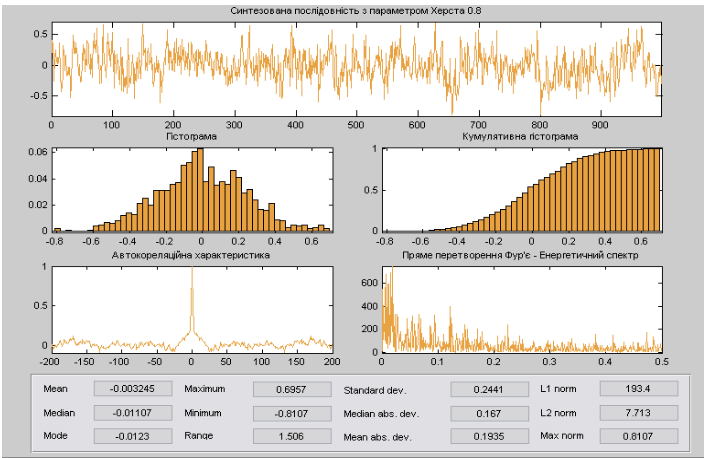

Рис. 3. Дослідження властивостей броунівського самоподібного процесу з параметром Херста 0,8

Ці результати важливі для аналізу застосувань мультиплексорів і комутаторів пакетних мереж, так як вони дають умови, при яких самоподібні в широкому сенсі потоки об'єднуються в строго або асимптотично самоподібні в широкому сенсі потоки.

Встановлено залежність параметру R/S від параметру Херста та об'єму вибірки дискретного часу:

Наведено результати досліджень застосування фрактального броунівського руху для аналізу процесів у мережах наступного покоління.

3. ВИСНОВКИ

Проведено дослідження особливостей трафіку високо-швидкісних пакетних мереж. Даний трафік не піддається опису стандартними методами теорії масового обслуговування, бо має самоподібні властивості. Необхідно застосовувати методи фрактального аналізу для визначення взаємозв'язку ступеню самоподібності трафіку і параметрів якості обслуговування. Проведено дослідження залежності нормованого розмаху сигналу від розміру вибірки диференційного часу та параметра Херста (ступеня самоподібності). Здійснено синтез та аналіз самоподібних броунівських процесів як моделі трафіку мереж NGN з різними значеннями параметру Херста. Розраховано їх основні статистичні характеристики. Встановлено, що для процесів з параметром Херста > 0,5 в автокореляційній характеристиці з'являється явище "важкого хвоста", що свідчить про довготривалу залежність, притаманну цим процесам.

1. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания. – М.: Машиностроение, 1979. – 425 с. 2. Фрактальный анализ и процессы в компьютерных сетях : учеб. пособие / Ю.Ю. Громов, Н.А. Земской, О.Г. Иванова, А.В. Лагутин, В.М. Тютюнник. – 2-е изд., стереотип. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2007. – 108 с. 3. Mandelbrot, B.B. Fractional Brownian motions, fractional noises and applications / B.B. Mandelbrot, J.W. Van Ness //SIAM Review. – 1968. – 10. – P. 422 – 437.