

---

УДК 621.324

В.В. Казімірова, В.Е.Кузьменко, К.В. Ключкевіч

Національний технічний університет «ХПИ», Харків

## МЕТОД АНАЛІЗУ ЗАВАНТАЖЕННЯ ВІРТУАЛЬНОГО З'ЄДНАННЯ МУЛЬТИСЕРВІСНОЇ МЕРЕЖІ

*Наведені результати теоретичних та експериментальних досліджень рівня завантаження віртуального з'єднання мультисервісної мережі, запропоновано метод аналізу завантаження мережі, якій дозволить враховувати особливості віртуальних з'єднань в телекомунікаційних мережах, що володіють властивостями самоподібності.*

**Ключові слова:** віртуальне з'єднання, самоподібність, масштабна інваріантність, завантаження мережі, транспортний TCP-протокол, трафік.

### Вступ

**Постановка завдання і аналіз літератури.** Із завданнями підвищення мережевої продуктивності пов'язана необхідність розробки нових підходів і моделей для дослідження експериментальних даних, що характеризують процеси, які спостерігаються в комп'ютерних мережах. Такі процеси мають складну структуру, що затрудняє розуміння механізмів міжмережевої взаємодії і обмежує застосування класичних статистичних і динамічних моделей, тому для визначення найбільш істотних особливостей мережевих процесів, що впливають на продуктивність мережевих додатків, широкого поширення набули евристичні підходи. При цьому враховується наступне:

1) процеси, що виникають при управлінні віртуальними з'єднаннями, можна поділити на два рівні: відносно повільні процеси встановлення з'єднання за допомогою протоколів маршрутизації і обміну параметрами з'єднання між джерелом і приймачем повідомлення; швидкі процеси, що призводять до варіацій затримок при проходженні пакетів через проміжні вузли віртуального з'єднання [1, 2];

2) повідомлення транспортного TCP-протоколу є потоком нумерованих байт, що розбивається на IP-пакети; управління інтенсивністю посилки цих пакетів здійснюється з використанням механізму зворотного зв'язку на основі обробки інформації про успішну передачу раніше посланих пакетів [3];

3) пакети передаються у віртуальний TCP-канал серіями, розмір яких залежить від параметрів транспортного протоколу, що динамічно настраюються; ці параметри залежать від випадкових затримок, що виникають між передачею пакетів і прийомом підтверджень про їх успішну доставку [4];

4) випадкові варіації величини затримки виникають із-за проходження пакетів через буфери пристроїв маршрутизації, а також в результаті зміни маршрутів передачі самих пакетів [5].

Таким чином, затримка є основним збудовуючим чинником в процесі передачі пакетів і сприймається як блокування передачі на коротких часових інтервалах. Тому інтенсивність передачі мережевого трафіку носить випадковий характер, а основні її параметри формуються під впливом механізмів управління на рівні транспортного протоколу. Такому характеру зміни трафіку при масштабі спостереження, сумірно-

му з часом приходу пакетів підтвердження, може бути зіставлена проста модель ON/OFF процесів. В цьому випадку мережевий потік даних має позитивне середнє значення, а його інтенсивність передачі  $\lambda$  визначається щільністю розподілу часу між суміжними ділянками ON-інтервалів.

Дані для ідентифікації характеристик трафіку і оцінки продуктивності TCP-з'єднань можна одержати за допомогою:

1) аналізу значень інтервалів часу між суміжними TCP-сегментами;

2) підрахунку кількості таких сегментів (або байт) за певний проміжок часу.

У першому випадку аналізується залежність вигляду

$$\Delta t_k = t_{k+1} - t_k, k = 1, 2, \dots, \quad (1)$$

де  $t_k$  – часова мітка приходу сегменту у вузол мережі,  $k$  – порядковий номер сегменту, а в другому оцінюється величина відношення

$$\lambda_k = \Delta N(t) / \Delta t_k, \quad (2)$$

де  $\Delta N(t) = N(t_{k+1}) - N(t_k)$  – число сегментів, відправлених до моменту часу  $t_k$ . Необхідні для аналізу чисельні значення  $\Delta t_k$  або  $\lambda_k$  можуть бути одержані за допомогою спеціальної процедури [3], яка настраюється на IP-адресу вибраного інтерфейсу мережевого пристрою.

При дослідженні особливостей процесів передачі пакетного трафіку в віртуальних TCP-з'єднаннях можна виділити такі стадії [6]: маршрутизація запиту і встановлення з'єднання; передача даних і контроль за перевантаженістю віртуального з'єднання; завершення з'єднання.

Перша і третя стадії природним чином впливають на динамічні процеси в мережі, тоді як виникнення перехідних процесів на другій стадії безпосередньо пов'язане з роботою пошукового алгоритму, за допомогою якого протокол TCP здійснює настрійку на поточне допустиме значення пропускної спроможності сполучної лінії.

Враховуючи вищевикладене, можна відзначити, що рівень завантаження мережі робить значний вплив на зниження рівня передачі пакетів, тому створення методів аналізу завантаження віртуального з'єднання є актуальним науковим завданням. **Метою даної статті** є розробка методів аналізу завантаження віртуального з'єднання, які дозволять враховувати особливості віртуальних з'єднань в телекомунікаційних мережах, що володіють властивостями самоподібності.

## Результати теоретичних досліджень

**Початкові схеми і співвідношення.** Для дослідження впливу різних параметрів віртуального з'єднання на характер протікання мережевих процесів розглянемо конфігурацію сегменту мережі, в яку включені: джерело і приймач даних, два маршрути-

затори  $M1$  і  $M2$ , через які здійснюється передача даних з проміжною буферизацією, дві високошвидкісні ( $l_1$  і  $l_3$ ) і одна низькошвидкісна ( $l_2$ ) лінії зв'язку.

Всі вузли цього мережевого сегменту є повністю спостережуваними з погляду залежностей типу (1) і (2). Тому одержані дані дозволяють повною мірою досліджувати специфіку як швидких процесів і локальну структуру мережевого трафіку, так і особливості проходження пакетів під впливом контуру зворотного зв'язку на рівні транспортного з'єднання.

Введемо міру  $\mu$ , за допомогою якої характеризуватимемо інтенсивність передачі трафіку на інтервалі часу  $(t, t+\Delta t)$ , тобто можна оцінити місткість TCP-з'єднання і середню інтенсивність трафіку. Ця величина обмежена і не може бути більше продуктивності найповільнішої сполучної лінії  $l_2$ . В нашому випадку продуктивність лінії  $l_2$  обмежена значенням  $q_{l_2} = 32 \text{ Кбіт/с}$ , а ліній  $l_1$  і

$l_3$  – величиною  $q_{l_1} = q_{l_3} = 2 \text{ Мбіт/с}$ . Проте, якщо в буфері маршрутизатора  $M2$  є певне число пакетів, то локальна інтенсивність надходження пакетів у вузол PC2 може бути вище за це граничне значення. Таким чином, миттєві значення для даного віртуального з'єднання є випадковими величинами, тобто можна ввести функцію щільності розподілу інтенсивності передачі трафіку для кожного сегменту TCP-з'єднання, позначивши її  $\lambda_i(t)$ ,

$i = 1, 2, \dots, n$  ( $n$  – число мережевих сегментів). У загальному випадку глобальних віртуальних з'єднань введена вище міра інтенсивності передачі трафіку  $\mu$  можна визначити за допомогою формули

$$\mu(E) = \lim_{n \rightarrow \infty} \int_E \lambda_1(t) \cdot \dots \cdot \lambda_n(t) dt, \quad (3)$$

яка дозволяє одержати мультиплікативну модель інтенсивності проходження потоку. Для дослідження властивостей мультиплікативної моделі зміни інтенсивності розглянемо першу фазу встановлення віртуального з'єднання. Ця фаза починається, коли на робочій станції PC1 – джерелі даних на прикладному рівні сформовано запит на відкриття TCP-з'єднання.

Фаза передачі даних здійснюється в дуплексному режимі і полягає у формуванні TCP-сегментів і пересилці їх адресату єдиним потоком нумерованих байт із збереженням послідовності генерації і формуванні підтверджень. На кінцевій фазі формується повідомлення CLOSE, яке потім відправляється на робочу станцію приймача. Використовуючи описаний механізм урахування подій при передачі пакетного трафіку, можна побудувати залежності типу (1) і (2), які характеризують динаміку мережевих процесів і на якісному рівні оцінити коректність використання моделі (3).

**Вимірювання реального трафіку.** Перша група вимірювань проводилася для маршрутизатора, в буфері якого розміщуються 4 TCP-сегменти, а приймач має 58 сегментів. Розмір вибірки – 5000 сегментів, число втрачених сегментів – 316. Аналіз результатів цих вимірювань: вибіркоче математичне

сподівання  $M\{\Delta t(t)\}=T=0,0806$  с, оцінка середньоквадратичного відхилення  $\sigma = 0,0304$  с.

Друга група вимірювань вивчала поведінку потоку даних в ТСП-з'єднанні при розмірі буфера маршрутизатора 20 сегментів і розмірі вікна приймача 58 сегментів. При 5000 відправлених сегментів кількість втрачених складала 46. Для цих даних  $M\{\Delta t(t)\}=T=0,0789$  с,  $\sigma = 0,0839$  с.

Наступні вимірювання були проведені при розмірі буфера маршрутизатора 40 сегментів (розмір вікна приймача, як і раніше – 58 сегментів). При довжині вибірки в 5000 сегментів, число втрачених сегментів – 20. Для наведених даних  $M\{\Delta t(t)\}=T=0,0784$  с,  $\sigma = 0,0970$  с. При розмірі буфера маршрутизатора 80 сегментів з тим же приймачем жоден сегмент не був втраченим,  $M\{\Delta t(t)\} = T = 0,0788$  с,  $\sigma = 0,2256$  с.

**Агрегація реального трафіку.** За допомогою наведених вище залежностей можна оцінити мультиплікативний характер впливу окремих мережевих параметрів на продуктивність віртуального з'єднання. У даному прикладі ефективна пропускна спроможність ТСП-з'єднання може бути оцінена величиною  $1/RTT$ , де усереднена за реалізацію величина  $RTT$  дорівнює 0,075 с.

Наведені дані показують, що на локальні флуктуації інтенсивності трафіку впливають робота операційної системи, об'єм буферів проміжних маршрутизаторів, типи інформаційних додатків, мережева топологія, число користувачів тощо. Використання процедури спостереження за станом мережевих з'єднань [3] свідчить про нестационарний характер їх зміни. В зв'язку з цим чинності набувають методи спостереження або прогнозування властивостей мережевих процесів, засновані на використанні узагальнених характеристик трафіку, які прийнято пов'язувати з властивістю статистичної самоподібності або масштабної інваріантності [6]. Стандартне визначення масштабної інваріантності стосовно властивостей безперервного процесу  $Z=\{Z(t), t \in T\}$  пов'язано з виконанням наступної рівності [7]:

$$Z(t)=a^{-H}Z(at), \quad t \in T, \quad a > 0, \quad 0 < H < 1, \quad (4)$$

яке розуміється в сенсі рівності за розподілом. Розглянувши раніше прикладом самоподібного процесу є броунівський рух  $B_H(t)$ . Якщо  $Z(t)$  зів'язати модель (3) і умову (4), то процес буде нестационарним, хоча може мати стаціонарні прирости. Дослідження мережевого трафіку як випадкового точкового процесу засновано на аналізі послідовності відліків  $X=\{X_k, k>1\}$  і властивостях агрегованого потоку [8]:

$$X_n^{(m)} = \frac{1}{m} \sum_{k=(n-1)m+1}^{nm} X_k, \quad n = 1, 2, \dots$$

Для обчислення  $X_n^{(m)}$  проводиться усереднювання значень початкового сигналу  $X_k$  на інтервалах, що перекриваються, розміром  $m$  відліків. Тому,

якщо сигнал  $X$  є приростом самоподібного процесу, тобто  $X_k=Z(k+1)-Z(k)$ , то для всіх цілих  $m$  виконується умова (рівність щодо вибраного розподілу d):

$$X_n = m^{1-H} \cdot X_n^{(m)}. \quad (5)$$

Дійсно, для  $n=1$  можна записати  $X_1=Z(2)-Z(1)$ ;  $mX_1^{(m)}=Z(m+1)-Z(1)$ . Аналогічно, для довільного значення  $n$  одержимо два співвідношення:  $X_n=Z(n+1)-Z(n)$ ;  $mX_n^{(m)}=Z(nm+1)-Z((n-1)m-1)$ .

Якщо властивість (5) виконується за умови  $m \rightarrow \infty$ , то процес  $X$  є асимптотично самоподібним. Аналогічно, стаціонарна послідовність є самоподібною (асимптотично самоподібною) другого порядку, якщо її агрегована підпослідовність  $m^{1-H}X^{(m)}$  має таку ж автокореляційну функцію, як і початкова послідовність  $X$ .

**Масштабна інваріантність трафіку.** При дослідженні властивостей мережевого трафіку властивість самоподібності зручно аналізувати не через рівність процесів (щодо розподілів), а за допомогою дослідження поведінки абсолютних моментів

$$\mu^{(m)}(q) = M\left\{\left|X^{(m)}\right|^q\right\} = M\left\{\left|\frac{1}{m} \sum_{k=1}^m X_k\right|^q\right\}. \quad (6)$$

Якщо  $X$  володіє властивістю самоподібності (5), то значення  $\mu^{(m)}(q)$  пропорційно значенню  $m^{\beta(q)}$ , тому для фіксованих значень  $q$  справедливо співвідношення

$$\log \mu^{(m)}(q) = \beta(q) \log m + C(q). \quad (7)$$

Виходячи з того, що згідно з (5) має місце

$$X_n = m^{1-H} \cdot X_n^{(m)},$$

вираз для показника ступеня  $\beta(q)$  можна записати в явному вигляді:

$$\beta(q) = q(H-1). \quad (8)$$

На використанні співвідношення (8) побудовано третє визначення самоподібності, яке зводиться до перевірки лінійної залежності змін  $\log \mu^{(m)}(q)$  при зміні  $\log m$ . По нахилу залежності  $\mu^{(m)}(q)$  на графіку в подвійному логарифмічному масштабі можна визначити значення  $H$ . У разі, коли  $\beta(q)$  нелінійно залежить від  $q$ , використовується поняття, узагальнює характеристики самоподібності на послідовності, для яких параметр  $H$  є змінною величиною (мультифрактали). Процес  $X(t)$  є мультифрактальним, якщо логарифм його абсолютних моментів  $\mu^{(m)}(q)$  змінюється лінійно разом із зміною логарифма рівня агрегації  $m$ . Якщо процес  $X(t)$  може приймати як позитивні, так і негативні значення, то розглядають його афінну мультифрактальність, а для аналізу його властивостей вже недостатньо використовувати інформацію тільки про поведінку других абсолютних моментів.

Слід зробити ряд зауважень щодо даних властивостей масштабної інваріантності для послідовностей  $X$  і  $X-M\{X\}$ . Остання послідовність може бути асимптотично самоподібною. Для аналізу таких дискретних послідовностей  $X$  з погляду вияву властивостей масштабної інваріантності на вибірках розміром  $N$  відліків використовуватимемо непараметричні статистики у вигляді абсолютних моментних функцій, побудованих для агрегованих серій спостережень

$$\hat{\mu}^{(m)}(q) = \frac{1}{N/m} \sum_{k=1}^{N/m} |X_k^{(m)}|^q \quad (9)$$

Якщо  $\log \hat{\mu}^{(m)}(q)$  змінюється лінійно відносно  $\log m$ , то процес  $X$  можна вважати мультифрактальним. Саме такий характер зміни  $\hat{\mu}^{(m)}(q)$  спостерігається в мережах при аналізі динаміки зміни продуктивності TCP-з'єднань. Параметр  $\alpha$  відповідає усередненому кутовому коефіцієнту нахилу одержаної залежності ( $q$  – порядок аналізованої моментної функції). Якщо  $\log \hat{\mu}^{(m)}(q)$  не змінюється лінійно із зміною  $\log m$ , то для дослідження властивостей трафіку розгляду підлягають також центровані послідовності  $X-M\{X\}$  і їх моментні функції вигляду

$$\hat{\mu}_0^{(m)}(q) = \frac{1}{N/m} \sum_{k=1}^{N/m} \left| X_k^{(m)} - \sum_{i=1}^N X_k \right|^q \quad (10)$$

За характером зміни залежностей типу (10) можна судити про масштабну інваріантність процесу. При цьому лінійна залежність  $\beta(q)$  від  $q$  свідчить про самоподібність аналізованого процесу, а нелінійний характер вказує на мультифрактальність.

### Висновки

В результаті аналізу завантаження віртуального з'єднання в телекомунікаційній мережі встановлено:

1. Дослідження властивостей масштабної інваріантності динамічних процесів у віртуальних з'єднаннях дозволяє зробити висновок про те, що їх характер визначається механізмом статистичного мультиплексування, при якому можлива втрата пакетів внаслідок перевантаження віртуальних з'єднань.

### МЕТОД АНАЛИЗА ЗАГРУЗКИ ВИРТУАЛЬНОГО СОЕДИНЕНИЯ МУЛЬТИСЕРВИСНОЙ СЕТИ

В.В. Казимирова, В.Е. Кузьменко, К.В. Ключкевич

Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований уровня загрузки виртуального соединения мультисервисной сети, предложен метод анализа загрузки сети, который позволит учитывать особенности виртуальных соединений в телекоммуникационных сетях, обладающих свойствами самоподобия.

**Ключевые слова:** Виртуальные соединения, самоподобие, масштабная инвариантность, загрузка сети, транспортный TCP-протокол, трафик.

### METHOD FOR VIRTUAL CONNECTION MULTISERVICE NETWORK DOWNLOAD ANALYSIS

V.V. Kazimirova, V.E. Kuzmenko, K.V. Kluchkevich

The results of theoretical and experimental studies of the level of faithful Intellectual multiservice network connection are presented. The method for analyzing the network will takes into account the features of virtual connections in telecommunication networks with properties of self-similarity is proposed.

**Keywords:** VC, self-similarity, scale invariance, network load, transport TCP-protocol traffic.

Для побудови моделі таких процесів може бути використана самоподібна множина станів, в якій втрата пакетів компенсується збільшенням часу передачі повідомлення, що призводить до формування протяжних статистичних часових залежностей.

2. Для дослідження властивостей масштабної інваріантності або самоподібності трафіку можна використовувати оцінки статистичних моментів різних порядків при розгляді характеру їх зміни в подвійному логарифмічному масштабі для різних параметрів агрегації спостережень

3. Таким чином, нами пропонується метод аналізу завантаження віртуального з'єднання, який дозволить враховувати особливості віртуальних з'єднань в телекомунікаційних мережах, що володіють властивостями самоподібності.

### Список литературы

1. Leland W. On the self-similar nature of IP-traffic / W. Leland., M. Taqqu, W. Willinger // *IEEE/ACM Transactions on Networking*. – 1997. – № 3. – P. 423-431.
2. Стеклов В.К. Телекомунікаційні мережі / В.К. Стеклов, Л.Н. Беркман. – К.: Техніка, 2001. – 392 с.
3. Захаров Г.П. Службы и архитектура ШЦСИО / Г.П. Захаров, М.В. Симонов, Г.Г. Яновский. – М.: ЭкоТрендз, 1993. – 102 с.
4. Варакин Л.Е. Введение в теорию инфокоммуникаций. Ч.1 / Л.Е. Варакин // *Электросвязь*. – 2000. – № 2 (14). – С. 2 – 11.
5. Фрактальный анализ процессов, структур и сигналов: Коллективная монография / Г.А. Кучук, А.А. Можжаев, Р.Э. Пащенко, К.М. Руккас и др. – Х.: ЭкоПерспектива, 2006. – 360 с.
6. Можжаев О.О. Моделирование трафика телекоммуникационной сети на базе масштабной инвариантности / О.О.Можжаев // *Збірник наукових праць ХУПС*. – Вип. 6(12). – Х.: ХУПС, 2006. – С. 79 – 82.
7. Кучук Г.А. Фрактальный гауссовский шум в трафиковых трассах / Г.А. Кучук // *Системи обробки інформації*. – Вип. 3. – Х.: ХВУ, 2004. – С. 91 – 99.
8. Кучук Г.А. Метод прогнозирования фрактального трафика / Г.А. Кучук, О.О. Можжаев, О.В. Воробйов // *Радиоэлектронні і комп'ютерні системи*. – 2006. – №6 (18). – С. 181 – 188.

Поступила в редколлегию 30.06.2012

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. О.А. Серков, Національний технічний університет «ХПІ», Харків.