DOI: 10.18372/2310-5461.67.20279
УДК 004.591(045)

А. С. Савченко, д-р техн. наук, професор
Державний університет «Київський авіаційний інститут»
https://orcid.org/0000-0001-8205-8852
E-mail: alina.savchenko@npp.kai.edu.ua;

А. В. Лєсна
Київський національний університет імені Тараса Шевченка
https://orcid.org/0000-0002-4684-7863
E-mail: lesnayaa2307@gmail.com;

А. І. Торошанко
Державний університет «Київський авіаційний інститут»
https://orcid.org/0000-0002-0816-657X
e-mail: atoroshanko@gmail.com

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ ОЗНАК ФРАКТАЛЬНОГО ТРАФІКУ

Вступ

Безпроводові інформаційно-комунікаційні мережі (БПМ) є одними з найважливіших об'єктів глобальної інформаційної інфраструктури. У процесі бурхливого розвитку всіх систем безпроводового зв'язку, передавання та опрацювання інформації виникають і нові проблеми загального характеру та притаманні саме для БПМ. У першу чергу це проблеми стійкості та живучості за умов впливу шумів та завад, обмежень на часові, енергетичні та інформаційні параметри мереж.

У статті розглядається сигнальний трафік безпроводової мережі критичного застосування. Ключовою характеристикою такого трафіку є інформаційна цінність [1–3]. Інформаційна цінність (ІЦ) – це показник, який використовується в статистичному аналізі даних, зокрема, у моделюванні ризиків для оцінки достовірності передбачень за незалежними змінними стосовно залежної змінної. Він допомагає визначити, які змінні найкорисніші для розрізнення окремих результатів (наприклад, прогнозування ризику). У широкому сенсі функціоналом ІЦ є так звана функція корисності [4], пов'язана з суб'єктивною імовірністю [5–6]. У більшості статистичних завдань функціонал корисності зводиться до лінійної функції ІЦ [5]. Надалі будемо використовувати саме такий функціональний зв'язок функції корисності з інформаційною цінністю.

Мережі критичного застосування є невід'ємними елементами критично важливої інфраструктури [2]. У свою чергу, системи критичної інфраструктури є основою сучасної взаємопов'язаної глобальної інформаційної інфраструктури [3]. У роботах [2, 3] також показано статистичний взаємозв'язок завадостійкості та цінності інформації, якою обмінюються абоненти, намічені шляхи отримання кількісних вимірів ІЦ. Застосування функціоналів корисності дає можливість уведення явних кількісних оцінок ІЦ та отримання виразів у замкненій формі для максимізації функцій корисності. При цьому практичним підґрунтям кількісних оцінок, безумовно, служать результати експериментальних досліджень.

Таким чином, метою представленої роботи є експериментальні дослідження показників фрактального мережного трафіку, вибір та обґрунтування найбільш релевантних та придатних показників за критеріями стабільності та інваріантності до змін параметрів трафіку.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Основоположниками фрактальної теорії є гідролог Херст [7, 8] та математик Мандельброт [9, 10]. Херст займався багаторічними спостереженнями рівня басейну річки Ніл та інших водоймищ. Саме Херстом виявлені фрактальні властивості змін рівня водоймищ.

Мандельброт першим розробив математичне підґрунтя фрактальної геометрії природи в цілому. Він поширив строгі математичні моделі фракталів на сфери фізики та хімії, економіки та фінансів, біології, астрономії тощо.

Основи теорії фрактальних процесів вичерпно викладені у роботах [11–15]. Однак теоретичні моделі справедливі лише для абстрактних, строго математичних функцій, які, на жаль, не мають практичного застосування, наприклад, сходи Кантора або сніжинка Коха тощо. Для фрактальних процесів, які виникають по чисто практичним причинам (типовий приклад – різнорідний

мережний трафік Triple Play або Quadruple Play) побудувати більш-менш достовірну математичну модель не вдається. Залишається один шлях – підтвердження фрактального характеру реальних процесів експериментальним шляхом як факту, який відбувся [16–18].

Стосовно експериментальних досліджень фрактального мережного трафіку відмітимо наступне. Протягом вісімдесятих-дев'яностих років XX ст. і по сю пору проведено тисячі експериментів з різнорідним мережним трафіком, опубліковано сотні статей та звітів з науково-дослідних робіт, у яких надано численні підтвердження фрактальної природи трафіку, що представляє практичний інтерес. Не вдаючись у перелік згаданих робіт (він зайняв би, мабуть, не одну сотню сторінок), відмітимо, що одними з перших були роботи [16–21].

За результатами експериментальних досліджень встановлено, що фрактальний трафік досить вдало описується розподілами з так званими «важкими хвостами» (heavy-tailed distributions, [19, 20]).

До розподілів з важкими хвостами відносять такі розподіли [25]: розподіл Парето; логарифмічний нормальний розподіл; розподіл Вейбулла з параметром форми $0 \le Weib_{fp} \le 1$; розподіл Берра; γ-розподіл; β-розподіл; логарифмічний розподіл Коші з «надважким хвостом». Він спадає повільніше, ніж розподіл Парето; інші розподіли, які зустрічаються рідше, ніж згадані вище.

Строго кажучи, усі відомі розподіли з важкими хвостами як моделі фрактального трафіку можуть застосовуватися на реальних інтервалах спостереження практично з однаковим успіхом. Справа в тому, що при досить великій апріорно накопиченій інформації всі розумні методи працюють добре (і приблизно однаково), а за малої кількості апріорної інформації різні методи дають різні рекомендації, але всі мало достовірні. Тому в даному конкретному випадку можна вибрати найзручніший метод, наприклад, метод Байєса, мінімаксний метод або метод максимуму правдоподібності з розподілом Парето, оскільки останній описується досить простими формулами [3–6, 25].

Стосовно розподілу Парето відмітимо, що першу згадку у доступних нам вітчизняних джерелах було зроблено у роботі [4]. Там відмічалося, що на користь застосування розподілу Парето говорить саме простота формул, якими він описується. (До речі, автором роботи [3] було надано додаткові міркування стосовно використання розподілу Парето у роботи [4] та інших роботах). Потім ту ж думку було висловлено у роботі [6].

Зв'язок інформаційної цінності та достовірності експериментально отриманих результатів

Інформаційна цінність – це комплексний показник, що використовується в статистичному аналізі даних, зокрема, у моделюванні ризиків для оцінки достовірності передбачень за незалежними змінними стосовно залежної змінної. Він допомагає визначити, які змінні найкорисніші для розрізнення різних результатів (наприклад, прогнозування ризику).

Ключовими компонентами є надійність (у сенсі повторюваності й достовірності), якість (у сенсі точності), стабільність (у сенсі збереження ключових параметрів) та стійкість до шумів та завад [1].

Відношення сигнал/шум – фундаментальне поняття у сфері інформаційної цінності, яке використовується при вимірах надійності та якості конкретного фрагменту даних або інформації.

Інформаційна цінність напряму впливає на ефективність складних інформаційних систем. Для кількісного оцінювання інформаційної цінності зазвичай формується функціонал у вигляді лінійної згортки факторів впливу [3].

У роботі [1] досліджуються три основні показники ефективності мереж загального призначення для *End-to-End* комунікацій (так званий триплет ключових показників ефективності (*Key Performance Indicators, KPIs triplet*): затримка доставки τ_d; надійність доставки (доставка без втрат та перекручень бітів) r_d; пропускна спроможність T_{hr}.

Стосовно ж дослідження безпроводових мереж критичного застосування як об'єктів критичної інфраструктури треба додати четвертий компонент *KPIs* – ефективну інформаційну ємність каналу $C_{\inf eff}$, безпосередньо пов'язану зі співвідношенням сигнал-шум *SNR*, степенем перекручення бітів *BER* та ймовірністю виконання поточної задачі впродовж назначеного періоду контрольного терміну (дедлайну) T_{dl}:

$$C_{\inf eff} = \Psi\left(SNR, BER, T_{dl}\right). \qquad (1)$$

Оскільки змінна *BER* є монотонною (квадратичною) функцією *SNR* [13], функціонал (1) приймає таку форму:

$$C_{\inf eff} = \Psi\left(SNR, BER, T_{dl}\right) = \Psi\left[SNR, \phi_{BER}\left(SNR\right), T_{dl}\right];$$
$$\phi_{BER}\left(SNR\right) = k_{SNR} \times \left(SNR\right)^2,$$

де k_{SNR} – ваговий коефіцієнт, що обирається за параметрами мережі.

У свою чергу, інформаційно-енергетичний функціонал безпроводової мережі критичного застосування залежить уже не від трьох, а від

чотирьох показників:

$$\Phi_{wncr} = \Phi\left[\tau_d, r_d, T_{hr}, C_{\inf eff}\right]$$

а триплет ключових показників ефективності переходить у квадруплет (*KPIs quadruplet*): мова – відео – дані – еволюція мобільних абонентів.

До статистичних показників мережного трафіку відносять:

- середню кількість $\hat{N}_{pinp}$ вхідних пакетів в одиницю часу;
- середню кількість $\hat{N}_{pout}$ вихідних пакетів в одиницю часу;
- середній час $\hat{\tau}_{prec}$ отримання пакетів;
- середній час $\hat{\tau}_{psend}$ відправлення пакетів;
- середню тривалість $\hat{T}_{scomm}$ сеансу зв'язку в мережі.

Частина об'єму пакету, що залишається, складає інформацію користувача.

У сучасних програмних продуктах ці дані використовуються для поєднаного поточного аналізу сигнатур та протоколів. Інформаційна цінність результатів аналізу залежить від дисперсії помилок оцінювання параметрів трафіку.

У роботі [1] докладно розглянуто задачу максимізації інформаційної цінності. Там показано, що вона, у разі обміну даними між довільними термінальними вузлами – джерелом та отримувачем, по суті, зводиться до максимізації функціоналу $\Phi_{wncr} \to \max\limits_{\tau_d, r_d, T_{hr}, C_{\inf eff}}$. Маршрут доставки даних R містить M транзитних ділянок та обраний оптимальним чином за квадруплетом

$$\left\{\tau_{dm}, r_{dm}, T_{hrm}, C_{\inf eff\, m}\right\},\ 1 \le m \le M\ .$$

На m-й транзитній ділянці: T_{hrm} – пропускна спроможність, від якої залежить швидкість передачі; τ_{dm} – затримка передачі.

На M транзитних ділянках маршруту результуючий функціонал ІЦ має комплексну цільову функцію

$$\varphi_{cr} = \Phi_{wncr} = \Phi\left[\tau_d, r_d, T_{hr}, C_{\inf eff}\right] \underset{\substack{r_d \to \max \\ C_{\inf eff} \to \max}}{\tau_d \to \min} \varphi_{cr\,\mathrm{opt}}.$$

Інакше кажучи, під час вибору оптимального маршруту мінімізується сумарна затримка та максимізується надійність доставки на кожній транзитній ділянці.

Враховуючи ці міркування, коротко розглянемо основне завдання дослідження та наведемо деякі принципові результати.

Завдання на експериментальні дослідження та опис плану експерименту

Дослідити трафік обчислювальних мереж різного масштабу: як великих корпоративних мереж масштабу міста (умовне позначення CN), так і обчислювальних мереж офісу, що налічують не більше 30 комп'ютерів (умовне позначення MN).

Приклад типової структури досліджуваної мережі [4] наведено на рис. 1.

Моніторинг мереж проводився за допомогою програми MRTG (The Multi Router Traffic Grapher). Програма запускається з інтервалом 2...5 хвилин. Всі зафіксовані значення записувалися у файл формату *.log.

Log-файл складається з двох частин: короткого першого рядку, який зберігає лічильники часу з моменту останнього1,1 запуску програми. У другій частині містяться записи в п'яти колонках в ASCII-форматі.

Основні результати експерименту

Ґрунтуючись на роботах [3, 4], проведені необхідні перетворення вихідних даних. Результати наводяться до виду, представленого в табл. 1.

Таблиця 1

Результати експерименту

Час запуску	Середня швидкість вхідного трафіку, (біт/с)	Середня швидкість вихідного трафіку, (біт/с)	Максимальна швидкість вхідного трафіку, (біт/с)	Максимальна швидкість вихідного трафіку, (біт/с)
25.07.04 12:25	13050583	2317207	15830073	2464601
25.07.04 12:20	7890773	2048019	9524104	2129705
25.07.04 12:15	5704802	1849079	5820777	1944039
25.07.04 12:10	5960443	1847060	6369003	1998003
25.07.04 12:05	6180268	1900502	6369003	1990803

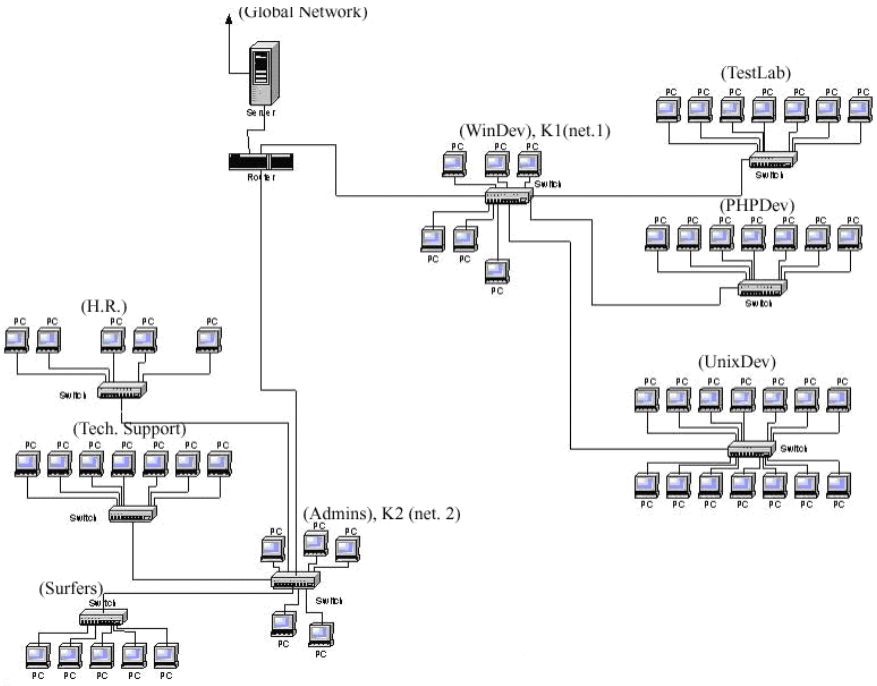

Рис. 1. Типова структура досліджуваної мережі

Інформаційні ознаки фрактального трафіку

Приховані періодичності виникають при коливаннях інтенсивності та викидах фрактального трафіку. У роботах [3, 28, 29] проаналізовано приховані періодичності та їх властивості. На підґрунті результатів згаданих робіт у нашій статті проведено порівняльний аналіз ефективності методів виявлення прихованих періодичностей. Зокрема, розглянуто такі методи виявлення прихованих періодичностей:

- кореляційно-регресійний;
- нормованого розмаху (R/S-аналізу);
- перетину нулів;
- вейвлет-аналізу;
- ортогональних розкладень.

Найбільш широко вживаними є метод R/S-аналізу, метод перетину нулів, та кореляційно-регресійний метод [3, 4]. Наприклад, у роботі [4] використаний метод R/S-аналізу. Він показав високу достовірність та стабільність для широкого діапазону параметрів фрактального трафіку.

Нормований розмах визначається так. Нехай $x(t)$ – деяка випадкова величина, що розглядається в дискретні проміжки часу τ_i протягом періоду спостережень τ_{observ},

$$\left\langle x(\tau)\right\rangle = \frac{1}{\tau_{observ}} \sum_{i=1}^{\tau_{observ}} x(\tau_i)$$ – її середнє значення,

а $$\sigma(\tau_{observ}) = \sqrt{\frac{1}{\tau_{observ}} \sum_{i=1}^{\tau_{observ}} \left[x(\tau_i) - \left\langle x(\tau_{observ})\right\rangle \right]^2}$$ – середньоквадратичне відхилення x. Позначимо через $\Delta x(T, \tau_{observ}) = \sum_{j=1}^{T} \left[x(j) - x(\tau_{observ}) \right]$ накопичене відхилення значень випадкової величини $x(T)$ від її середнього значення $\left\langle x\right\rangle$ за час T. Різниця між точною верхньою і точною нижньою гранями значень $\Delta x(T, \tau_{observ})$ називається розмахом $R(\tau)$, тобто.

$$R(\tau_{observ}) = \sup\left[\Delta x(T, \tau_{observ})\right] - \inf\left[\Delta x(T, \tau_{observ})\right],$$

де $1 \le T \le \tau_{observ}$.

Розглянутий розмах $R(\tau)$ явно залежить від періоду τ і росте разом з ним. Безрозмірне відношення R/S (нормований розмах) дозволяє порівнювати розмах для різних явищ. У [7] при розв'язку завдань, пов'язаних із накопиченням водних ресурсів, було вперше виявлено, що нормований розмах R/S добре описується емпіричним співвідношенням $(R/S) = (\tau_{observ}/2)^H$.

Зазначене співвідношення отримало назву закону Херста, а показник H – параметру Херста. Подальші дослідження [8] показали, що закон Херста виконується для багатьох інших природних явищ та процесів. На великому емпіричному матеріалі було встановлено, що величина показника Херста групується поблизу значень ~0,73…~0,72 [7, 8]. Проблема теоретичного обґрунтування цього факту залишається відкритою.

Для випадкового процесу з незалежними збільшеннями та кінцевою дисперсією було строго доведено [10], що показник H дорівнює 0,5.

Як відомо [3, 4, 14], експериментально отримані дані стосовно фрактальних процесів (зокрема, фрактальний трафік) припускають агрегування, причому до певної межі зберігається масштабна інваріантність. Чим ближче параметр Херста до одиниці, тим більше припускається послідовних кроків агрегування зі збереженням масштабної інваріантності. У роботі [4] отримані дані були агреговані за рівнями DT = 30 хв, DT = 2 год, DT = 24 год, в результаті чого були отримані відповідні часові ряди *CN* – 30 хв, *CN* – 2 год, *CN* – 24 год, *LN* – 2 год, *LN* – 24 год. На рис. 2 зображені вихідні *LN* – 5 хв та агреговані *LN* – 30 хв. часові ряди, а на рис. 3 – вихідні *CN* – 2 год та агреговані *CN* – 24 год.

Чітко прослідковується, особливо для фрактального трафіку великої корпоративної мережі (див. рис. 3), масштабна інваріантність агрегованих фрагментів. Це підтверджує думку про стабільність відносних параметрів періодичності фрактального трафіку. Відмітимо також, що на масштабну інваріантність у певній мірі впливає фізичний розмір (число комп'ютерів) мережі.

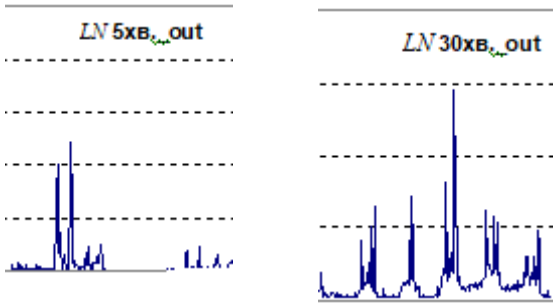

Рис. 2. *LN*-часові ряди

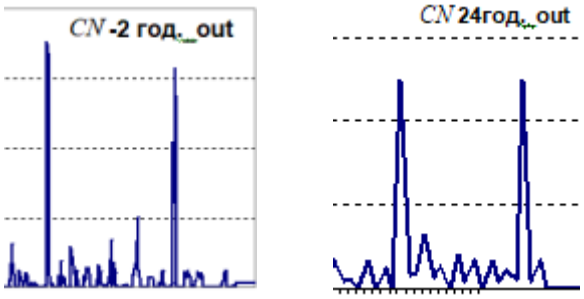

Рис. 3. *CN*-часові ряди

На підґрунті спектральної теорії [3, 28, 29] можна зробити наступні висновки.

На параметри поточного спектру детермінованих сигналів впливають шуми та завади, а також довжина інтервалу спостереження T_{obs}. Чим менше сумарна енергія шумів та завад і чим більше T_{obs}, тем менше інтервал прихованої періодичності τ_{hidd}.

У роботі [3] запропоновані емпіричні моделі деяких детермінованих та випадкових сигналів при однаковій сумарній енергії шумів і завад:

– для прямокутного імпульсу – показникова залежність від T_{obs}: $f_{rect}\left(T_{obs}\right)$;

– для фрактального трафіку – показникова залежність від T_{obs}: $f_{exper}\left(T_{obs}\right)^{c_{exper}}$.

Тут $f_{rect}\left(T_{obs}\right)$. – відома функція, яка визначається за формулами для детермінованих сигналів, напр., для прямокутного імпульсу – нормована функція невизначеності

$$\rho(\tau,F)=\begin{cases}\left|\dfrac{\sin\pi F\tau_p\left(1-|\tau|/\tau_p\right)}{\pi F\tau_p\left(1-|\tau|/\tau_p\right)}\right|, & |\tau|\le\tau_p\\ 0, & |\tau|>\tau_p\end{cases};$$

де τ_p – довжина імпульсу; $f_{exper}\left(T_{obs}\right)^{c_{exper}}$ – відома функція, яка визначається для фрактального процесу за результатами експериментів; c_{exper} – відомий показник ступеня, який визначається за результатами експериментів.

При наявності шумів та завад з апріорі невідомими параметрами використовуються оцінки по максимуму правдоподібності (ОМП) – граничний випадок оцінки случай оцінки по максимуму апостеріорної імовірності (АПІ), коли кількість апріорної інформації прагне до нуля [29]. ОМП є спроможною, асимптотично ефективною, асимптотично гаусівською; при об'ємі вибірки $N\to\infty$ ОМП збігається по імовірності до точного значення.

Для широкого класу функцій втрат (ФВ) оптимальна оцінка є умовне середнє, якщо АПІ є унімодальною и симетричною відносно умовного середнього.

Усі вказані властивості пов'язані з поведінкою ОМП при великих. Вони дають деяке обґрунтування для використання ОМП навіть тоді, коли ефективної оцінки не існує [29].

Байєсівські оцінки мінімізують ризик $\Re$:

$$\Re\triangleq E\left\{c\left[a,\hat{a}(\vec{R})\right]\right\}=\int_{-\infty}^{\infty}dA\int_{-\infty}^{\infty}c\left[A,\hat{a}(\vec{R})\right]\times \times p_{a,r}(A,\vec{R})d\vec{R}. \quad (2)$$

Математичне сподівання в (2) береться по випадковій величині a та по спостережуваним величинам $\vec{\mathbf{r}}$.

Вибір функції втрат (ФВ)

ФВ має бути адекватною мірою вартості – степеню задоволення користувача, і як така може бути суб'єктивною властивістю [5].

ФВ повинна приводити до завдання, що веде до розв'язку.

ФВ пов'язана з ризиком $\Re$.

Для квадратичної ФВ ризик відповідає СКВ, тобто $\Re_{\min}$ є середнє умовної дисперсії по всіх спостереженнях.

Для ФВ по модулю $\Re_{\text{abs min}}$ – медіана АПВ.

Для простої ФВ $\Re_{uni}$ – max АПВ (в кожному випадку необхідно переконатися, чи є рішення абсолютним максимумом).

Аналіз та вибір інформаційних ознак по експериментальним даним

Ґрунтуючись на результатах порівняльного аналізу проведених експериментів (див. розділ V), можна зробити остаточний висновок про стабільність періодів (квазіперіодів) агрегованого фрактального трафіку. Також спостерігається стійкість агрегованих фрактальних процесів до шумів та завад при параметрах Херста $H > (0,7 \ldots 0,75)$ та на досить великих інтервалах спостереження $T_{obs} \geq 100(n\Delta\tau_i)$, де $\Delta\tau_i$ – середній на інтервалі спостереження період слідування пакетів, $n = 1 \ldots 1,2$ – масштабний коефіцієнт.

Відповідно до наведених міркувань можна стверджувати, що й інформаційна цінність обраного параметру – квазіперіоду агрегованого фрактального процесу – є уповні придатною для практичного використання при дослідженнях інформаційно-комунікаційних систем та мереж.

Обговорення результатів дослідження

У представленій роботі надано результати теоретичного аналізу та експериментальних досліджень фрактального мережного трафіку. Об'єкти досліджень обмежені комп'ютерними мережами малого масштабу (локальні безпроводові мережі, до яких входять до 30 комп'ютерів) та середнього масштабу (корпоративні мережі, до яких входять не менше 200 комп'ютерів).

У продовження цієї теми, яка на нашу думку, представляє певний практичний інтерес, було б доцільно розширити сферу практичних досліджень як по числу комп'ютерів мереж, так і по діапазону параметрів Херста.

Висновки

1. Сучасні комп'ютерні мережі критичної інфраструктури, як правило, є мультимедійними системами реального часу з фрактальним трафіком. За умов сьогодення проблема роботи у реальному часі, як у м'якому, так і у жорсткому, набуває надзвичайної нагальності.

2. Також є актуальною проблема поточної обробки фрактального трафіку у широкому діапазоні параметрів Херста, довжин інтервалів спостереження тощо.

3. У нашій роботі представлені результати експериментальних досліджень фрактального трафіку. На підґрунті практичних результатів зроблені деякі теоретичні висновки та рекомендації стосовно вибору ключових показників, стабільних та стійких до факторів впливу, що заважають.

4. Наведені результати аналізу зв'язку обраних ключових показників з інформаційною цінністю ознак фрактального трафіку. Ці результати представляють практичний інтерес, оскільки ключові показники ефективності надалі будуть розширюватися та ускладнюватися.

5. У подальшому планується продовжити дослідження у даному науковому напрямі. Зокрема, намічено отримати вирази у замкненій формі стосовно функціоналів інформаційної цінності для різних функцій затримки доставки, наскрізної якості сервісу, співвідношень бітових помилок.

На нашу думку, неабиякий інтерес представляє проблематика фізичних відмов критичних вузлів та елементів мереж великого масштабу (сотні й тисячі комп'ютерів) та методів запобігання відмов. Цю низку проблем також планується розв'язати у майбутньому.

ЛІТЕРАТУРА

[1] Пономаренко О. В., Мошенський А. О., Савченко А. С., Швець І. П. Інформаційна цінність сигнального трафіку безпроводових мереж критичного застосування. *Наукоємні технології*. 2021. № 3(51). С. 210–221. https://doi.org/10.18372/2310-5461.51.15688

[2] OECD, Good Governance for Critical Infrastructure Resilience, OECD Reviews of Risk Management Policies, OECD Publishing, Paris. 2019. 118 p. https://doi.org/10.1787/02f0e5a0-en

[3] Савченко А. С. Методи розподіленого управління корпоративними комп'ютерними мережами. [Текст]. дис... докт. техн. наук: 05.13.06 – Інформаційні технології / Савченко Аліна Станіславівна; Національний авіаційний ун-т. К., 2021. 298 с.

[4] Савченко А. С Вибір параметрів комутаційного обладнання на підставі аналізу трафіку обчислювальних мереж [Текст]: дис... канд. техн. наук: 05.13.13 – Обчислювальні машини, системи та мережі / Савченко Аліна Станіславівна; Національний авіаційний ун-т. К., 2007. 110 с.

[5] De Groot M. Optimal Statistical Decisions. McGraw Hill, 2004. 512 pp.

[6] Ложковський А. Г., Вербанов О. В. Підвищення точності розрахунку характеристик якості обслуговування за самоподібного трафіку мережі. Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова, 2015, № 1. С. 36–41.

[7] Hurst H.E. Long-term storage capacity of reservoirs. *Transactions of American Society of Civil Engineers*. 1951. Т. 116. С. 770–808.

[8] Hurst H.E. The Nile: A General Account of the River and the Utilization of Its Waters. Constable, 1957. 311 p.
[9] Mandelbrot B.B. The Fractal Geometry of Nature, Times Books, 1982. 468 p.
[10] Mandelbrot B., Hudson R.L. The Misbehavior of Markets: A Fractal View of Financial Turbulence. Basic Books, 2006. 368 p.
[11] Tanenbaum A., Feamster N., Wetherall D. Computer Networks, Global Edition Pearson, 6th Edition, 2021. 944 p.
[12] Stallings W. Computer Organization and Architecture, 10th Ed. / Pearson Education, Inc., Hoboken, NJ, 2016. 864 pp.
[13] Beran J. Statistics for Long-Memory Processes / New York: Chapman and Hall, 1994. 328 p.
[14] Stallings W. High-Speed Networks and Internets: Performance and Quality of Service / 2nd Ed. Pearson Education, 2002. 744 pp.
[15] Pipiras V., Taqqu M.S. Long-Range Dependence and Self-Similarity, Cambridge University Press, 2017. 688 p.
[16] Erramilli A. Experimental Queuing Analysis with Long-Range Dependent Packet Traffic / A. Erramilli, O. Narayan, W. Willinger // IEEE/ACM Transactions on Networking. April 1996.
[17] Erramilli A. Applications of Fractals in Engineering for Realistic Traffic Processes / A. Erramilli, J. Gordon, W. Willinger. *Teletraffic Science and Engineering*, Vol. 1, 1994, pp. 35–44. https://doi.org/10.1016/B978-0-444-82031-0.50012-3
[18] Leland W. E., Taqqu M. S., Willinger W., Wilson D. V. On the Self-Similar Nature of Ethernet Traffic. *ACM SIGCOMM, Computer Communication Review*. 2004. Vol. 23, Issue 4. p. 183–193.
[19] Perlingeiro F.R., Ling L.L. Uma Nova Abordagem para Estimação da Banda Efetiva em Processos Fractais. IEEE Latin America Trans., Vol. 3, No. 5, 2005. pp. 436–446.
[20] Khan I., Li V.O.K. Traffic control in ATM networks. Computer Networks and ISDN Systems, Vol 27, Issue 1, 1994. pp. 85–100. https://doi.org/10.1016/S0169-7552(09)80007-X
[21] Marie R. R., Blackledge J., Bez H. On the fractal characteristics of Internet network traffic and its utilization in covert communications. IEEE Xplore, 2009 International Conference for Internet Technology and Secured Transactions, (ICITST), 29 Jan. 2010. https://doi:10.1109/ICITST.2009.5402542
[22] Crovella M. E., Bestavros A., Self-similarity in World Wide Web traffic: evidence and possible causes, IEEE/ACM Transactions on networking, 5(6), 1997, p. 835–846. https://doi.org:10.1109/90.650143
[23] Kratz M.F., Resnik S.I. The Q-Q estimator and heavy tails. Stochastic Models, 1996, 12 (4), pp. 699–724. https://doi.org/10.1080/15326349608807407
[24] Foss S., Korshunov D., Zachary S. An Introduction to Heavy-Tailed and Subexponential Distributions, 2nd ed. 2013 Edition, Springer Science+Business Media, New York, 2015. 168 p. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7101-1
[25] Forbes C. Statistical Distributions: 4-th Ed.: / Catherine Forbes, Merran Evans, Nicholas Hastings, Brian Peacock: John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2011. 212 pp.
[26] Garrett M. Analysis, Modeling, and Generation of Self-Similar VBR Video Traffic / M. Garrett, W. Willinger. Proceedings, SIGCOMM`94. August 1994. pp. 269–280. https://doi.org/10.1145/190314.190339
[27] Popescu A. Traffic Self-Similarity. Blekinge Institute of Technology, Department of Telecommunications and Signal Processing, Swedish: Blekinge, Telecom City, 2001. 31 pp. DiVA, id: diva2:837607
[28] Max J. Methodes et techniques de traitement du signal et applications aux mesures physiques, Tome 1 Principes Generaux et Methodes Classicues. MASSON, Paris New York Barcelone Milan Mexico Rio de Janeiro, 1977. 379 p.
[29] The advanced theory of statistics, Vol. 3, 4th Edition, Kendall, M., Stuart, A., Ord, J. K., High Wycombe: Charles Griffin, 1983. 780 p. https://doi.org/10.1002/for.3980040310

Савченко А. С., Лєсна А. В., Торошанко А. І.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ ОЗНАК ФРАКТАЛЬНОГО ТРАФІКУ

Проблема підвищення стабільності систем критичної інформаційної інфраструктури за умов динамічної еволюції факторів ризику (як правило, зі статистичною невизначеністю) базується на підґрунті політик та моделей управління. Управління стабільністю критично важливої мережної інфраструктури неможливе без вибору та обґрунтування кількісних інформаційних характеристик сигнального трафіку. Задача стає не тривіальною для різнорідного сигнального трафіку, який набуває самоподібних (фрактальних) властивостей. У статті розглянуто інформаційні потоки сигнального трафіку, що циркулює у безпроводових мережах Triple Play та Quadruple Play критичного застосування. Проведено експериментальні дослідження достатнього обсягу, за результатами яких вибрано та обґрунтовано найбільш цінні інформаційні ознаки фрактального трафіку. Показниками інформаційної цінності є періодичні та квазіперіодичні сплески інтенсивності, притаманні фрактальному трафіку з параметрами Херста, які змінюються у певному діапазоні значень. Показано,

що квазіперіодичні сплески інтенсивності є джерелами прихованих періодичностей, проведено порівняльний аналіз методів виявлення прихованих періодичностей, надано статистичні характеристики методу нормованого розмаху (методу R/S аналізу) як одного з ефективних практичних методів.

Ключові слова: мережа критичної інфраструктури, моделі управління, фрактальний трафік, інформаційна цінність, приховані періодичності, метод R/S аналізу.

Savchenko A., Lesna A., Toroshanko A.

EXPERIMENTAL STUDIES OF INFORMATION SIGNS OF FRACTAL TRAFFIC

The problem of increasing the stability of critical information infrastructure systems under conditions of dynamic evolution of risk factors (as a rule, with statistical uncertainty) is based on the background of policies and management models. Managing the stability of critical network infrastructure is impossible without selecting and substantiating quantitative information characteristics of signal traffic. The task becomes non-trivial for heterogeneous signal traffic, which acquires self-similar (fractal) properties. The article considers information flows of signal traffic circulating in Triple Play and Quadruple Play wireless networks of critical application. Experimental studies of sufficient volume have been conducted, based on the results of which the most valuable information features of fractal traffic have been selected and substantiated. Indicators of information value are periodic and quasi-periodic intensity spikes inherent in fractal traffic with Hurst parameters that vary in a certain range of values. It is shown that quasi-periodic intensity spikes are sources of hidden periodicities, a comparative analysis of methods for detecting hidden periodicities is carried out, and statistical characteristics of the normalized range method (R/S analysis method) as one of the effective practical methods are provided.

Keywords: critical infrastructure network, control models, fractal traffic, information value, hidden periodicities, R/S analysis method.

Стаття надійшла до редакції 30.07.2025 р.
Прийнято до друку 10.09.2025 р.