ISSN 2306-4412 (Print), ISSN 2306-4455 (CD-ROM), ISSN 2708-6070 (Online)

УДК 004.7

[0000-0002-8557-3443] **Г. М. Дрєєва**[1], *аспірантка*,
e-mail: gannadreeva@gmail.com
[0000-0001-6951-2002] **О. М. Дрєєв**[1], *канд. техн. наук, доцент*,
[0000-0001-8791-0063] **Є. В. Мелешко**[1], *д-р техн. наук, професор*,
[0000-0003-2007-9943] **І. В. Миронець**[2], *канд. техн. наук, доцент*
[1]Центральноукраїнський національний технічний університет
просп. Університетський, 8, м. Кропивницький, 25006, Україна
[2]Черкаський державний технологічний університет,
б-р Шевченка, 460, м. Черкаси, 18006, Україна

ПРОГРАМНА ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ КОМП'ЮТЕРНОЇ МЕРЕЖІ З СИМУЛЯЦІЄЮ МУЛЬТИФРАКТАЛЬНОГО ТРАФІКУ НА ОСНОВІ ЛАНЦЮГА МАРКОВА

У роботі представлено розроблену програмну імітаційну модель комп'ютерної мережі з симуляцією мультифрактального трафіку на основі ланцюга Маркова для тестування алгоритмів маршрутизації. Для генерації структури комп'ютерної мережі розроблено метод на основі теорії складних мереж. Для симуляції мережевого трафіку розроблено метод генерації мультифрактальної бінарної послідовності з використанням ланцюга Маркова.

Комп'ютерна мережа у розробленій моделі представлена повнозв'язним неорієнтованим зваженим графом, в якому вузлами є маршрутизатори, а ребрами – мережеві зв'язки між ними. Вага ребер – величина, обернена до пропускної спроможності каналу зв'язку. Вузли містять черги, в яких розміщуються прийняті пакети перед визначенням маршруту їх відправлення та відправкою на наступний вузол. Час у моделі представлений дискретними ітераціями. Маршрутизація здійснюється на основі тих алгоритмів, які необхідно протестувати на моделі.

Для симуляції мережевого трафіку у розробленій програмній імітаційній моделі запропоновано метод генерації бінарної мультифрактальної послідовності на основі ланцюгів Маркова зі стохастичним автоматом, який дозволив керувати фрактальною розмірністю бінарного ряду на різних масштабах.

Ключові слова: *комп'ютерні мережі, програмна імітаційна модель, мережевий трафік, фрактальна розмірність, показник Херста, мультифрактальність.*

Вступ. У цій роботі створено програмну імітаційну модель комп'ютерної мережі на основі теорії складних мереж, фрактального аналізу та марківських процесів. Ця програмна імітаційна модель дозволяє генерувати структуру комп'ютерної мережі та симулювати рух трафіку між мережевими пристроями з метою тестування алгоритмів маршрутизації.

У розробленій програмній імітаційній моделі використання алгоритмів з теорії складних мереж дозволило генерувати структуру комп'ютерних мереж різного розміру, які відповідають реальним мережам за своїми властивостями. Складні мережі – це стохастичні мережі з нетривіальною топологією, що відрізняються від класичних стохастичних мереж наявністю невеликої кількості вузлів з великою кількістю зв'язків [1, 2]. Більшість реальних мереж є складними, наприклад, комп'ютерні, транспортні, екологічні, соціальні мережі тощо. У складних мереж є такі основні властивості [1-4]: безмасштабність, невеликий діаметр мережі, високий коефіцієнт кластеризації та високий коефіцієнт транзитивності, гігантська зв'язна компонента, наявні ієрархічні зв'язки та складні кластерні утворення (кліки, клани тощо), асортативність (виникнення зв'язків між вершинами зі схожими властивостями). Для симуляції руху мережевого трафіку по згенерованих мережах було використано теорію фрактального аналізу та ланцюги Маркова. В результаті дослідження методів симуляції мережевого трафіку виділено такі відомі методи [5-7]: на основі пуассонівського процесу; на основі фрактального броунівського руху; на основі фрактального гаусівського шуму з використанням дискретного вейвлет-перетворення, на основі фрактального руху

DOI: .24025/2306-4412.4.2022.269137

Леві, авторегресійні моделі, нейромережеві моделі. Використання ж ланцюгів Маркова дозволяє створювати вкрай прості, порівняно з попередніми перерахованими методами, моделі генерування дискретного трафіку з широким діапазоном властивостей.

Мета та задачі дослідження. Метою цієї роботи є розробка та дослідження програмної імітаційної моделі комп'ютерної мережі з мультифрактальним трафіком для тестування алгоритмів маршрутизації.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

– розробити метод генерації трафіку з мультифрактальними властивостями;

– розробити метод програмного моделювання комп'ютерної мережі для дослідження методів генерації і маршрутизації трафіку;

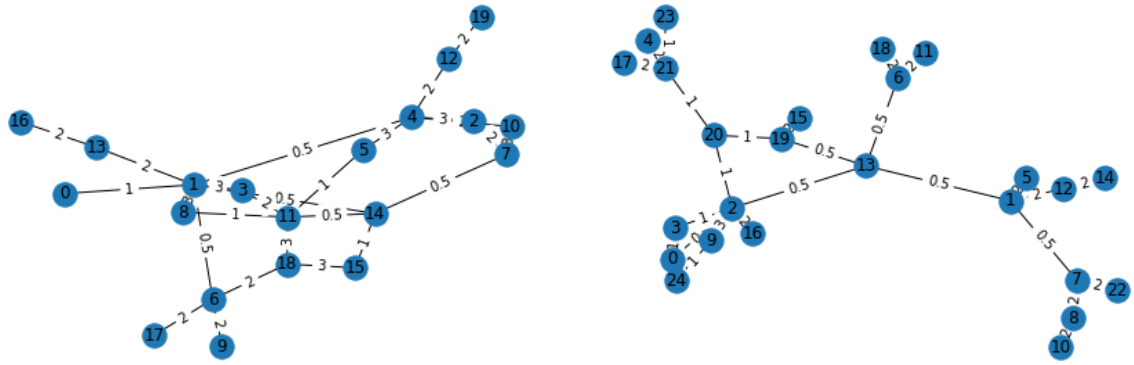
– провести експериментальне дослідження запропонованого методу генерації трафіку на програмній імітаційній моделі.

У попередніх роботах авторами було запропоновано та досліджено генератор фракталоподібного бінарного трафіку на основі ланцюгів Маркова [8-9] та метод генерації структури комп'ютерної мережі [10]. У цій роботі пропонується вдосконалена версія генератора трафіку для програмної моделі, яка дозволяє надати йому мультифрактальних властивостей, що точніше відповідає властивостям реального трафіку у комп'ютерних мережах.

Виклад основного матеріалу. Комп'ютерна мережа у розробленій моделі представлена повнозв'язним неорієнтованим зваженим графом, в якому вузлами є маршрутизатори, а ребрами – мережеві зв'язки між ними. Вага ребер – величина, обернена до пропускної спроможності каналу зв'язку. Вузли містять черги, де розміщуються прийняті пакети перед визначенням маршруту їх відправлення та обробкою. Час у моделі представлений дискретними ітераціями. Маршрутизація здійснюється на основі алгоритму, який і необхідно протестувати на моделі. Симулюється поширення мультифрактального трафіку.

Етапи роботи розробленої програмної імітаційної моделі:

Етап 1. Генерація структури комп'ютерної мережі на основі моделі Барабаши-Альберт, призначеної для генерації складних мереж [11]. Приклади згенерованих мереж наведено на рисунку 1.



(*a*) (*b*)

Рисунок 1. Приклади структур комп'ютерних мереж, згенеровані у розробленій програмній імітаційній моделі

Етап 2. Перевірка, чи отриманий граф мережі є повнозв'язним. Якщо згенерований граф не повнозв'язний – додавання ребер між відокремленими частинами графу.

Етап 3. Присвоєння ребрам ваги, що залежить від того, які вершини вони з'єднують – чим більше зв'язків у вузлів, які з'єднує ребро, тим менша вага цього ребра (і відповідно тим більша пропускна спроможність відповідного каналу зв'язку).

Етап 4. Генерація пакетів трафіку. На кожний вузол з деякою ймовірністю відправляється випадкова кількість пакетів з випадковими адресатами. Пристрій, що отримав пакети, ставить їх у свою внутрішню чергу. Трафік генерується з мультифрактальними властивостями.

Етап 5. Тестування алгоритмів маршрутизації. Обирається алгоритм маршрутизації для тестування. Пакети трафіку, що стоять у чергах у вузлах мережі, обслуговуються за до-

DOI: .24025/2306-4412.4.2022.269137

помогою обраного алгоритму маршрутизації. Моделюється рух пакетів по мережі. Якщо деякому пакету не вистачило місця у черзі деякого вузла, пакет втрачається. У моделі підраховуються всі отримані та втрачені пакети.

Етап 6. Завершення роботи моделі. Відбувається після досягнення заданої кількості ітерацій (наприклад, 1000 ітерацій) або, якщо модель працює у спрощеному режимі роботи (з однократною генерацією трафіку), то умовою зупинки також може бути стан, коли всі черги порожні і всі пакети розісланоДля симуляції мережевого трафіку у розробленій програмній імітаційній моделі запропоновано метод генерації бінарної фракталоподібної послідовності. У попередніх роботах [8-9] авторами було запропоновано та досліджено генератор фракталоподібного бінарного трафіку на основі ланцюгів Маркова. У цій роботі пропонується вдосконалена версія генератора трафіку, яка дозволяє надати йому мультифрактальних властивостей, що точніше відповідає властивостям реального трафіку у комп'ютерних мережах.

У цій роботі додано механізм до генератора бінарного трафіку на основі стохастичного автомата *G*, який дозволив керувати фрактальною розмірністю бінарного ряду на різних масштабах. Це значно розширить коло застосовності генератора.

В результаті попереднього дослідження було використано генератор трафіку *G* (рисунок 2), який містить два стани «1», «0» та ймовірності залишити стан незмінним p(«0»→«0»)=p_0 та p(«1»→«1»)=p_1. Генератор видає значення поточного стану дискретно по події відсутності або здійсненню зміни стану.

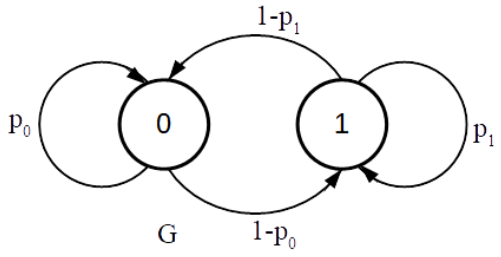


Рисунок 2. Генератор фракталоподібної бінарної послідовності

Для такого генератора інтенсивність трафіку можна визначити за формулою [8]

$$\lambda = \frac{1-p_0}{2-(p_0+p_1)}. \quad (1)$$

Зазначимо, що при p_0=p_1 генерування трафіку проходить з інтенсивністю 0.5, але при зміні ймовірностей залишити наступне значення без змін змінюється його фрактальна розмірність.

Також у статті [8] авторами проведено теоретичне оцінювання фрактальної розмірності утворюваного бінарного трафіку, який залежить не лише від ймовірностей параметрів генерування, але й від розміру піддіапазону, тобто масштабування у часі. Для абстрагування від розміру піддіапазону було знайдено межу, коли довжина піддіапазону прямувала до одиниці.

В більшості випадків обрання методу генерування трафіку має ґрунтуватися на властивостях трафіку, отриманого експериментально з комп'ютерної мережі, де буде впроваджено алгоритми маршрутизації трафіком.

Загалом трафік у реальних комп'ютерних мережах має мультифрактальні властивості, зокрема, про це свідчать дослідження [12, 13].

Мультифрактальність часового ряду та методи керування мультифрактальними особливостями. Як показано в [14] (рисунок 3), зміна фрактальної розмірності з масштабуванням у часі реальних даних трафіку є актуальною досить тривалий час, про це свідчить наявність публікацій на тему розробки ефективного мультифрактального генератора трафіку [12, 13]. При цьому на реальних даних фрактальна розмірність може як зростати, так і спадати зі збільшенням часового масштабу.

Для перевірки фрактальних властивостей розробленого в [8] генератора трафіку було проведене оцінювання показника Херста під час імітаційного експерименту. Імітаційний експеримент полягав у проведенні R/S аналізу на генерованій бінарній послідовності. Одну з реалізацій методу R/S аналізу описано в [15], і через його низьку точність вимірювання проводиться 200 разів на різних реалізаціях послідовності.

DOI: .24025/2306-4412.4.2022.269137

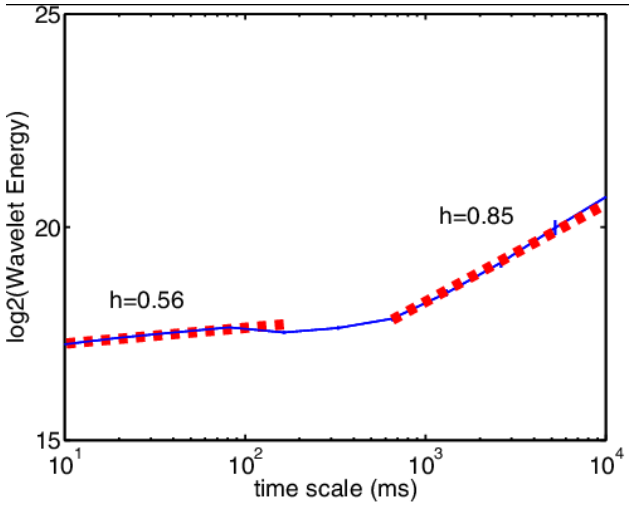


Рисунок 3. Зміна показника Херста від масштабу в часі [12]

З метою розкриття залежності показника Херста від довжини часткових (кумулятивних) сум при R/S аналізуванні побудовано графік залежності показника Херста від довжини цих сум (рисунок 4). Графік на рисунку 4 містить два пучки кривих, де кожна крива відповідає одному експериментальному визначенню показника Херста з вказаним масштабуванням. Верхній пучок кривих відповідає експерименту вимірювання показника Херста при параметрах генератора *G* p_0=p_1=0.9, а нижній пучок кривих побудовано при p_0=p_1=0.1. Є очевидним збігання пучків до *H*=0.5.

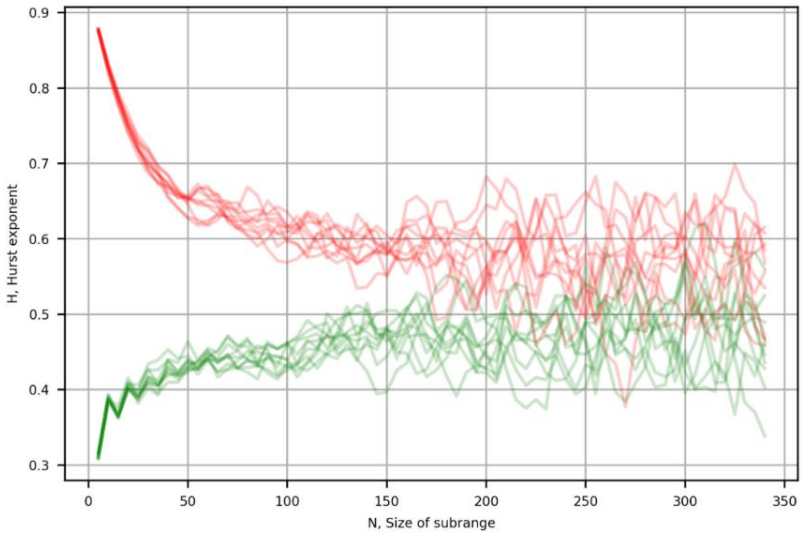


Рисунок 4. Залежність показника Херста від довжини інтервалу *N* при R/S аналізі

Практичні реалізації мультифрактального трафіку комп'ютерної мережі можуть різнитися на різних масштабах, тому за мету цієї роботи поставлено додавання механізму до генератора бінарного трафіку на основі стохастичного автомата *G*, який дозволив би керувати фрактальною розмірністю бінарного ряду на різних масштабах. Це значно розширить відповідність генерованих даних до реального трафіку мережі та коло застосовності генератора.

З метою регулювання фрактальної розмірності генерованого трафіку автори пропонують на базі генератора *G* використовувати наступну каскадну модель генератора бінарного трафіку (рисунок 5):

DOI: .24025/2306-4412.4.2022.269137

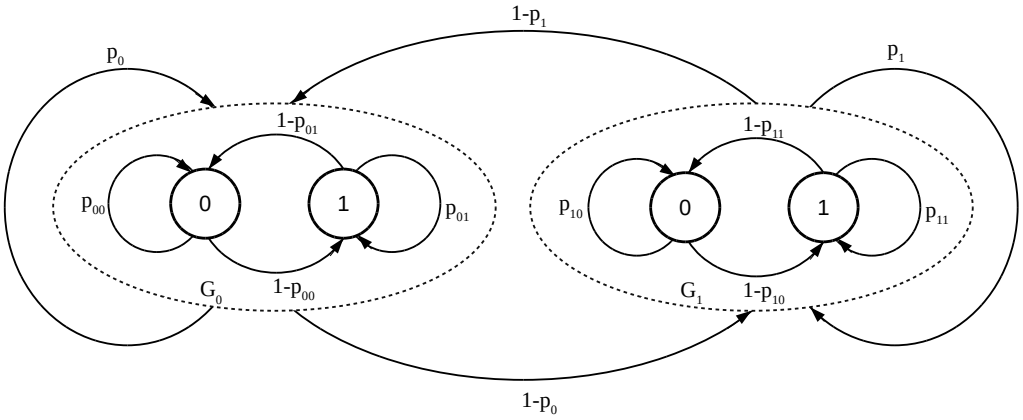


Рисунок 5. Генератор мультифрактальної бінарної послідовності

Запропонований генератор є каскадним, містить зовнішній генератор G, який агрегує в собі генератори G_0 та G_1. Завдяки цьому властивості генератора задаються такими величинами: p_{00}, p_{01} – ймовірності залишити наступне значення незмінним для генератора G_0; p_{10}, p_{11} – ймовірності залишити наступне значення незмінним для генератора G_1; p_0, p_1 – ймовірності залишити наступну серію з d значень для того самого генератора G_i, що і в попередній серії.

Відповідно до утворення кумулятивних сум генератори G_0 та G_1 повинні розрізнятися в досить тривалому часовому проміжку, що при однаковій інтенсивності генерованого трафіку за граничною теоремою не є можливим. Тому генератори налаштовують на генерування послідовностей з однаковою фрактальною розмірністю, але з різною інтенсивністю трафіку. За балансування загальної інтенсивності трафіку на великому масштабі відповідає зовнішній генератор G, який у наведеному прикладі є симетричним і завдяки цьому усереднює потоки з генераторів G_0 та G_1.

З метою візуально оцінити утворені ряди на рисунку 6 показано бінарний ряд, який агреговано по 25 відліків.

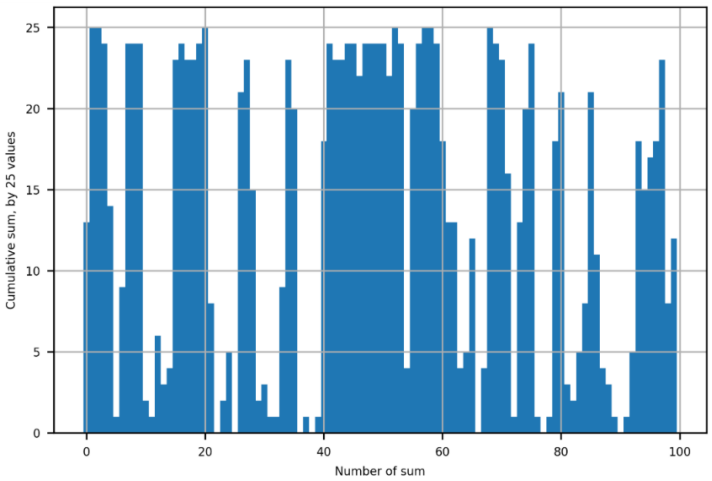


Рисунок 6. Приклад генерованого каскадним генератором трафіку, який має персистентність на більш широкому часовому масштабі

Результат є характерним для пульсуючого трафіку високої інтенсивності τ=0.5. Цей ряд отримано з такими параметрами генерування:

$$d=10;\ p_0=0.9;\ p_1=0.9;\ p_{00}=0.95;\ p_{01}=0.15;\ p_{10}=0.15;\ p_{11}=0.95. \quad (2)$$

Наступна діаграма побудована аналогічно, але при таких параметрах:

$$d=10;\ p_0=0.05;\ p_1=0.05;\ p_{00}=0.95;\ p_{01}=0.15;\ p_{10}=0.15;\ p_{11}=0.95. \quad (3)$$

Потрібно наголосити, що зміни відбулися лише для модулятора трафіку G (рисунок 7).

DOI: .24025/2306-4412.4.2022.269137

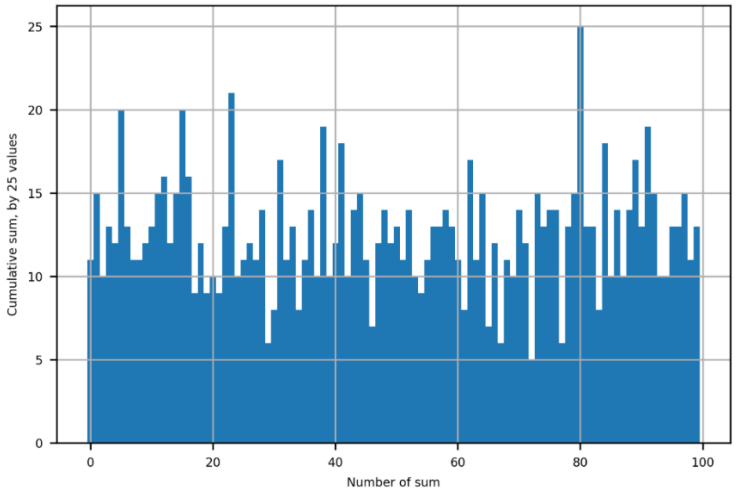


Рисунок 7. Приклад генерованого каскадним генератором трафіку, який є персистентним та антиперсистентним на різному часовому масштабі

Крива залежності показника Херста $H(p)$ від ймовірності зміни наступного значення p показана на графіку рисунка 8. Графік містить три пучки кривих, які відповідають налаштуванням генератора (2), (3), які були вже наведені, і (4):

$$d=10;\ p_0=0.00;\ p_1=1.00;\ p_{00}=0.90;\ p_{01}=0.90;\ p_{10}=0.90;\ p_{11}=0.90. \quad (4)$$

Це означає, що модулятор переключається на роботу лише генератора G_1 з параметрами $p_{10}=0.90$; $p_{11}=0.90$ і це відповідає роботі генератора G без корегування фрактальної розмірності на більших часових ділянках. На рисунку 8 це показано зеленим, середнім пучком кривих.

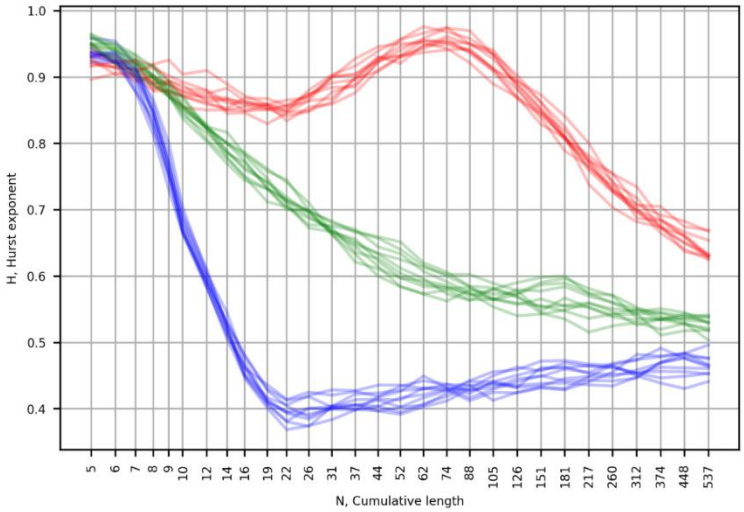


Рисунок 8. Приклади залежності показника Херста від масштабу в часі для реалізацій каскадним генератором (верхній та нижній пучки кривих) та стандартним генератором (середній пучок кривих)

Результати досліджень. У роботі розроблено програмну імітаційну модель комп'ютерної мережі з симуляцією мультифрактального трафіку на основі ланцюга Маркова для тестування алгоритмів маршрутизації. Для генерації структури комп'ютерної мережі розроблено метод на основі теорії складних мереж. Для симуляції мережевого трафіку розроблено метод генерації мультифрактальної бінарної послідовності з використанням ланцюга Маркова. Експериментально підтверджено відповідність практичних результатів до теоретичних, хоча при виведенні аналітичних залежностей було використано нестандартну метрику вираження міри покриття.

DOI: .24025/2306-4412.4.2022.269137

Обговорення результатів. В результаті числового експерименту встановлено факт можливості регулювання показника Херста на заданому часовому масштабуванні. Отримані часові ряди за допомогою каскадного генератора бінарної послідовності мають мультифрактальні властивості. Тобто каскадний генератор має більше можливостей щодо підгонки до реальних прикладів бінарного трафіку. Використання каскадного генератора є можливим лише при можливості його легкого налаштування, що фактично означає можливість отримати коефіцієнти d, p_0, p_1, p_{00}, p_{01}, p_{10}, p_{11} з прикладу реального трафіку.

Висновки. У цій статті в межах створення програмної імітаційної моделі комп'ютерної мережі з симуляцією мультифрактального трафіку на основі ланцюга Маркова вирішено такі задачі:

− розроблено метод генерації трафіку з мультифрактальними властивостями у вигляді бінарного часового ряду на рівні «пакет є» – «пакета немає»;

– розроблено метод програмного імітаційного моделювання комп'ютерної мережі для тестування алгоритмів маршрутизації.

Наукова новизна проведеного дослідження полягає в такому:

1. Удосконалено метод генерації мережевого трафіку на основі ланцюга Маркова, який відрізняється від відомих тим, що використовує каскадну модель генератора бінарної числової послідовності на рівні «пакет є» – «пакета немає» і дозволяє генерувати трафік з мультифрактальними властивостями з можливістю їх регулювання.

2. Розроблено метод програмного імітаційного моделювання комп'ютерної мережі на основі теорії складних мереж та удосконаленого методу генерації мережевого мультифрактального трафіку, що дозволяє тестувати алгоритми та протоколи маршрутизації.

Практичне значення. Розроблено алгоритми генерації структури комп'ютерної мережі й алгоритми генерації мультфрактального мережевого трафіку, що дають можливість здійснювати програмне імітаційне моделювання комп'ютерних мереж і тестувати алгоритми та протоколи маршрутизації.

Перспективи подальших досліджень. Запропонований каскадний генератор вимагає подальшого теоретичного дослідження для аналітичного вираження коефіцієнтів d, p_0, p_1, p_{00}, p_{01}, p_{10}, p_{11} через бажані фрактальні характеристики та інтенсивність потоку. Тому у подальших наукових дослідженнях планується дослідити це питання.

Список використаних джерел

[1] A.-L. Barabási, *Network Science*. Cambridge University Press, 2018. [Online]. Available: http://networksciencebook.com/

[2] В. В. Пасічник, та Н. М. Іванущак, "Дослідження та моделювання складних мереж", *Східно-Європейський журнал передових технологій*, вип. 2, № 3 (44), с. 43-48, 2010.

[3] V. A. Traag, *Algorithms and Dynamical Models for Communities and Reputation in Social Networks*. Springer International Publishing, 2014, p. 229. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-319-06391-1

[4] D. J. Watts, and S. H. Strogatz, "Collective dynamics of "small-world" networks", *Nature*, vol. 393 (6684), pp. 440-442, 1998. [Online]. Available: https://www.nature.com/articles/30918

[5] S. Robert, and J. Y. Le Boudec, "New models for pseudo self-similar traffic", *Performance Evaluation*, vol. 30 (1-2). pp. 57-68, 1997.

[6] G. Horn, A. Kvalbein, J. Blomskøld, and E. Nilsen, "An empirical comparison of generators for self-similar simulated traffic", *Performance Evaluation*, vol. 64 (2), pp. 162-190, 2007.

[7] T. Sobh, K. Elleithy, and A. Mahmood, Eds., *Novel Algorithms and Techniques in Telecommunications and Networking*. Springer, 2010, pp. 41-46.

[8] H. M. Drieieva, O. A. Smirnov, O. M. Drieiev, and T. V. Smirnova, "A fractal analysis of a Markov chain based self-similar traffic generator", *Central Ukrainian Scientific Bulletin, Engineering sciences*, vol. 2 (33), pp. 161-172, 2019.

[9] H. Drieieva, O. Drieiev, Ye. Meleshko, M. Yakymenko, and V. Mikhav, "A method of determining the fractal dimension of network traffic by its probabilistic properties and experimental research of the quality of this method", *CEUR-WS*, vol. 3171, pp. 1694-1707, Gliwice, Poland, 2022. [Online]. Available: http://ceur-ws.org/Vol-3171/paper120.pdf

DOI: .24025/2306-4412.4.2022.269137

[10] Є. Мелешко, Г. Дрєєва, та В. Міхав, "Програмна імітаційна модель комп'ютерної мережі для тестування алгоритмів марштуртизації трафіку", на *міжнар. наук.-техн. конф. "Автоматика, комп'ютерно-інтегровані технології та проблеми енергоефективності в промисловості і сільському господарстві (АКІТ-2022")*. Кропивницький: Ексклюзив-Систем, 2022, с. 26-27.

[11] A.-L. Barabási, and R. Albert, "Emergence of scaling in random networks", *Science*, vol. 286, no. 5439, pp. 509-512, 1999. [Online]. Available: https://doi.org/10.1126/science.286.5439.509

[12] G. Millán, and G. Lefranc, "A fast multifractal model for self-similar traffic flows in high-speed computer networks", *Information Technology and Quantitative Management (ITQM2013). Procedia Computer Science*, 17, pp. 420-425, 2013.

[13] E. Areström, and N. Carlsson, "Early online classification of encrypted traffic streams using multi-fractal features", in *IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)*, 2019, pp. 84-89. doi: 10.1109/INFCOMW.2019.8845127.

[14] V. J. Ribeiro, Z.-L Zhang, S. Moon, and C. Diot, "Small-time scaling behavior of Internet backbone traffic", Computer Networks, vol. 48, pp. 315-334, 2005. doi: 10.1016/j.comnet.2004.11.012

[15] "Hurst exponent evaluation and R/S-analysis in Python", *GitHub - Mottl/hurst*. [Online]. Available: https://github.com/Mottl/hurst

References

[1] A.-L. Barabási, *Network Science*. Cambridge University Press, 2018. [Online]. Available: http://networksciencebook.com/

[2] V. V. Pasichnyk, and N. M. Ivanushchak, "Research and modeling of complex networks", *Skhidno-Yevropeiskyi zhurnal peredovykh tekhnolohii*, iss. 2, no. 3 (44), pp. 43-48, 2010 [in Ukrainian].

[3] V. A. Traag, *Algorithms and Dynamical Models for Communities and Reputation in Social Networks*. Springer International Publishing, 2014, p. 229. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-319-06391-1

[4] D. J. Watts, and S. H. Strogatz, "Collective dynamics of "small-world" networks", *Nature*, vol. 393 (6684), pp. 440-442, 1998. [Online]. Available: https://www.nature.com/articles/30918

[5] S. Robert, and J. Y. Le Boudec, "New models for pseudo self-similar traffic", *Performance Evaluation*, vol. 30 (1-2). pp. 57-68, 1997.

[6] G. Horn, A. Kvalbein, J. Blomskøld, and E. Nilsen, "An empirical comparison of generators for self-similar simulated traffic", *Performance Evaluation*, vol. 64 (2), pp. 162-190, 2007.

[7] T. Sobh, K. Elleithy, and A. Mahmood, Eds., *Novel Algorithms and Techniques in Telecommunications and Networking*. Springer, 2010, pp. 41-46.

[8] H. M. Drieieva, O. A. Smirnov, O. M. Drieiev, and T. V. Smirnova, "A fractal analysis of a Markov chain based self-similar traffic generator", *Central Ukrainian Scientific Bulletin, Engineering sciences*, vol. 2 (33), pp. 161-172, 2019.

[9] H. Drieieva, O. Drieiev, Ye. Meleshko, M. Yakymenko, and V. Mikhav, "A method of determining the fractal dimension of network traffic by its probabilistic properties and experimental research of the quality of this method", *CEUR-WS*, vol. 3171, pp. 1694-1707, Gliwice, Poland, 2022. [Online]. Available: http://ceur-ws.org/Vol-3171/paper120.pdf

[10] Ye. Meleshko, H. Drieieva, ta V. Mikhav, "Software simulation model of a computer network for testing traffic routing algorithms", in *Int. Sci. and Tech. Conf. Automation, Computer-Integrated Technologies and Problems of Energy Efficiency in Industry and Agriculture (AKIT-2022)*. Kropyvnytskyi: Ekskliuzyv-System, 2022, pp. 26-27 [in Ukrainian].

[11] A.-L. Barabási, and R. Albert, "Emergence of scaling in random networks", *Science*, vol. 286, no. 5439, pp. 509-512, 1999. [Online]. Available: https://doi.org/10.1126/science.286.5439.509

[12] G. Millán, and G. Lefranc, "A fast multifractal model for self-similar traffic flows in high-speed computer networks", *Information Technology and Quantitative Management (ITQM2013). Procedia Computer Science*, 17, pp. 420-425, 2013.

DOI: .24025/2306-4412.4.2022.269137

[13] E. Aresträm, and N. Carlsson, "Early online classification of encrypted traffic streams using multi-fractal features", in *IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)*, 2019, pp. 84-89. doi: 10.1109/INFCOMW.2019.8845127.

[14] V. J. Ribeiro, Z.-L Zhang, S. Moon, and C. Diot, "Small-time scaling behavior of Internet backbone traffic", Computer Networks, vol. 48, pp. 315-334, 2005. doi: 10.1016/j.comnet.2004.11.012

[15] "Hurst exponent evaluation and R/S-analysis in Python", *GitHub - Mottl/hurst*. [Online]. Available: https://github.com/Mottl/hurst

H. M. Drieieva[1], *Postgraduate Student,*
e-mail: gannadreeva@gmail.com
O. M. Drieiev[1], *Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,*
Ye. V. Meleshko[1], *Doctor of Technical Sciences, Professor,*
I. V. Myronets[2], *Candidate of Technical Sciences, Associate Professor*
[1]Central Ukrainian National Technical University
Universitetskiy ave., 8, Kropyvnytskyi, 25006, Ukraine
[2]Cherkasy State Technological University
Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine

SOFTWARE SIMULATION MODEL OF COMPUTER NETWORK WITH MULTIFRACTAL TRAFFIC SIMULATION BASED ON MARKOV CHAIN

In the work, a software simulation model of a computer network with multifractal traffic simulation based on the Markov chain for testing routing algorithms is developed. A method based on the theory of complex networks has been developed to generate the structure of a computer network. To simulate network traffic, a method of generating a multifractal binary sequence using the Markov chain has been developed.

A computer network in a developed model is represented by a fully connected undirected weighted graph, in which nodes are routers, and edges are network connections between them. The weight of the edges is the inverse of the bandwidth of the communication channel. Nodes contain queues in which received packets are placed before determining the route of their dispatch and sending them to the next node. Time in the model is represented by discrete iterations. Routing is carried out on the basis of those algorithms, which must be tested on the model.

To simulate network traffic, in the developed software simulation model, a method of generating a binary multifractal sequence based on Markov chains with a stochastic automaton, which makes possible to control the fractal dimension of the binary series on different scales, is proposed. As a result of a numerical experiment, the fact of the possibility of adjusting the Hurst index on a given time scale has been established. It is shown that the obtained time series using the cascading generator of the binary sequence have multifractal properties. That is, the cascading generator has more possibilities for adaptation to real examples of binary traffic.

The scientific novelty of the conducted research is as follows: 1. The method of network traffic generation based on the Markov chain has been improved, which differs from the known ones in that it uses a cascade model of the generator of a binary numerical sequence at the "packet present" - "packet absent" level and allows to generate a traffic with multifractal properties with the possibility of their adjustment. 2. A method of software simulation modeling of a computer network based on the theory of complex networks and an improved method of generating network multifractal traffic, which allows to test routing algorithms and protocols, has been developed.

Keywords: *computer networks, software simulation model, network traffic, fractal dimension, Hurst exponent, multifractality.*

DOI: .24025/2306-4412.4.2022.269137