

В. О. Компанієць, П. Є. Пустовойтов

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

МЕТОД МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ САМОПОДІБНОГО ТРАФІКУ У ІНФОКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖАХ

Анотація. Висвітлено новий підхід до вирішення проблеми адекватного моделювання мережевого трафіку. Запропоновано новий метод, що дозволяє генерувати самоподібні потоки пакетів з довільним заданим ступенем самоподібності у інфокомунікаційних мережах. Метод базується на використанні розподілу Парето та методу максимальної правдоподібності для оцінки параметрів моделі. Отримані результати можуть бути використані для побудови більш реалістичних імітаційних моделей інфокомунікаційних мереж. Автори пропонують метод математичного апарату для процедури формування самоподібного трафіку, який полягає в створенні точної та ефективної моделі, що відображає реальні властивості самоподібності у потоках даних. Запропоновано ефективний інструмент для моделювання складних мережевих процесів, що дозволяє точніше прогнозувати поведінку інфокомунікаційної мережі та оптимізувати її роботу. У представленій статті запропоновано процедуру формування самоподібного трафіку на основі закону розподілу Парето. Цей закон обраний завдяки своїй здатності описувати випадкові величини з довгими хвостами, що притаманно багатьох реальних систем. Основним параметром, що визначає рівень самоподібності потоку, є параметр Херста, що дозволяє гнучко моделювати різні сценарії трафіку. Запропонована процедура є важливим інструментом для дослідників та інженерів, що займаються моделюванням та аналізом мережевого трафіку, може застосовуватися для моделювання трафіку у інфокомунікаційних мережах, що сприяє покращенню точності відтворення реальних умов роботи мереж.

Ключові слова: самоподібний трафік, параметр Херста, розподіл Парето, метод, інфокомунікаційна мережа.

Вступ

Актуальність дослідження. Дослідження математичних моделей самоподібного трафіку, що надходить до вузла інфокомунікаційної мережі, є надзвичайно актуальним у сучасних умовах зростання обсягів даних і складності мережевих систем. Самоподібність трафіку, що характеризується довготривалими залежностями та важкими хвостами розподілів, має істотний вплив на проектування, управління та оптимізацію мереж. Традиційні моделі, які припускають випадковість з короткотривалою пам'яттю, не можуть адекватно відобразити реальні умови роботи мереж, де трафік часто виявляє самоподібні властивості.

Актуальність цієї теми зростає на фоні швидкого розвитку технологій, таких як Інтернет речей, потокове відео та великі дані, які створюють нові виклики для мережевої інфраструктури. Моделі самоподібного трафіку дозволяють краще передбачити навантаження на вузли мережі, оптимізувати ресурси та покращити якість обслуговування. Точне моделювання таких явищ є ключовим для забезпечення стабільності та ефективності мережевих систем у реальних умовах. Крім того, розробка математичних моделей самоподібного трафіку допомагає у виявленні та вирішенні проблем, пов'язаних із затримками, перевантаженням та втратами пакетів у мережах. Моделі, що враховують самоподібність, забезпечують точніше прогнозування навантаження і дозволяють краще управляти ресурсами, що критично важливо для забезпечення надійності та ефективності сучасних інфокомунікаційних мереж.

Вивчення математичних моделей самоподібного трафіку також має велике значення для розробки нових алгоритмів і технологій управління мережами. Інновації в цій області можуть включати адаптивні

методи контролю трафіку, нові підходи до маршрутизації та управління якістю обслуговування, що забезпечують більш ефективне використання мережевих ресурсів та покращують загальну продуктивність мереж. Таким чином, дослідження математичних моделей самоподібного трафіку є важливим кроком до вдосконалення інфокомунікаційних мереж, забезпечення їх стабільності та ефективності, а також розробки нових технологічних рішень, які відповідають вимогам сучасних та майбутніх комунікаційних середовищ.

Огляд літератури. Математичний апарат марківських моделей доволі часто використовується для моделювання мереж. Марківські моделі є статистичними моделями, що використовуються в багатьох реальних застосуваннях та спільнотах. Використання марківських моделей стало переважати в останні десятиліття, що підтверджується великою кількістю опублікованих статей. У [1] розглянуто більш ніж 200 публікацій щодо марківських моделей, що були застосовані до різних сфер застосування. Стаття демонструє значні тенденції у дослідженнях варіантів марківських моделей та їх застосувань, але носить лише оглядовий характер. Так, за допомогою математичного апарату марківських ланцюгів стало можливим моделювати різні види трафіка та різні протоколи [2, 3].

При побудові марківських моделей функціонування інфокомунікаційних мереж традиційно припускають пуасонівський характер вхідного трафіку. Але, з виходом статті [4] таке припущення, щодо пуасонівського трафіку було розвінчано. Було показано, що реальний трафік має післядію, а для виміру рівня післядії трафіка стали використовувати параметр Херста H [5]. Такий трафік ще називають пачечним чи самоподібним. Це явище пояснюється наявністю довгої пам'яті в процесах, що генерують трафік, наприклад, при передачі великих файлів або

потоківому відео, де інтенсивність трафіку залишається високою протягом тривалих проміжків часу, створюючи ефект кластеризації та залежності між різними часовими інтервалами. У сучасних моделях мереж намагаються закладати властивість самоподоби до відповідних моделей. Наприклад, у [6] розглядаються засоби передбачення поведінки складної системи масового обслуговування із автокореляційним вхідним потоком, що має післядію, але така модель сильно залежить від якості даних.

Постановка мети та задач дослідження. Статистичні спостереження за мережним трафіком у реальних інфокомунікаційних мережах показали, що вхідний потік пакетів даних має властивість самоподібності. Більшою мірою властивість самоподібності виявляється у наявності післядії у випадковому характері трафіку. Це означає, що зростання навантаження в мережі може призвести до ще більшого збільшення навантаження надалі.

Аналітичний опис процесу функціонування інфокомунікаційної мережі із заданим значенням параметра самоподібності відсутній. У зв'язку з цим природним є використання імітаційних моделей. Для побудови адекватної імітаційної моделі необхідно імітувати мережевий трафік із фрактальною складовою.

Мета дослідження – розробити алгоритми та математичні інструменти, які дозволять генерувати та аналізувати трафік з властивостями самоподібності, такі як довгі хвости розподілів та автокореляційні структури. Це включає в себе **задачі** розробки нових методів для моделювання та оцінки параметрів самоподібності, що відповідають різним типам мереж та навантажень. Окрім цього, **задачі** також передбачають інтеграцію розроблених моделей у реальні сценарії мережевого управління, щоб перевірити їх ефективність у прогнозуванні навантаження, управлінні ресурсами та оптимізації якості обслуговування. Важливою частиною задачі є верифікація та калібрування математичного апарату на основі реальних даних, що дозволить забезпечити його практичну застосовність і точність у відображенні самоподібності трафіку в різних умовах мережної роботи.

Результати досліджень

Метод отримання випадкової послідовності інтервалів між пакетами. Перш ніж генерувати випадкову послідовність із післядією розглянемо метод отримання випадкової послідовності за будь-яким наперед заданим законом розподілу. Нехай випадкова величина X розподілена за деяким законом

$$F(x) = P(X \leq x) = \int_{-\infty}^x f(x) dx = y, \quad (1)$$

де $f(x)$ - щільність розподілу випадкової величини X . Функція розподілу $F(x)$ визначає ймовірність того, що випадкова величина X менша або дорівнює x .

Знайдемо тепер зворотну функцію $F^{-1}(u)$, яка визначається як така, що для всіх значень u з інтервалу $[0, 1]$ виконується рівняння

$$F^{-1}(F(u)) = u. \quad (2)$$

Далі для генерування випадкового числа U з рівномірного розподілу на інтервалі $[0, 1]$ використо-

вується генератор рівномірних випадкових чисел. У свою чергу, за допомогою зворотної функції отримуємо значення випадкової величини x , які отримуються з $F^{-1}(u)$, рис. 1.

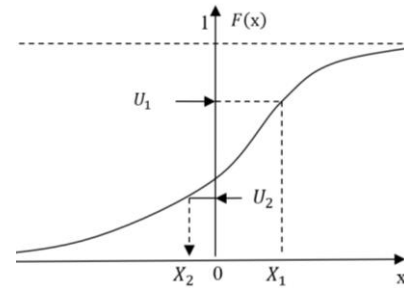


Рис.1. Отримання випадкового значення за заданим законом розподілу

За визначенням закон розподілу $F(u)$ випадкової величини $U \in$

$$F(y) = P(U < y) = P(F(u) < F(x)) = P(U < x) = F(x) = y, \quad (3)$$

причому $0 \leq y \leq 1$.

Використовуючи (3), напишемо

$$P(U < x) = \int_{-\infty}^x f(x) dx = y. \quad (4)$$

Тоді, якщо $y_1, y_2, y_3, \dots, y_k, \dots$ - послідовність значень випадкової величини U рівномірно розподіленої в інтервалі $[0, 1]$, то, вирішуючи рівняння (4) щодо верхньої межі x , отримаємо послідовність $x_1, x_2, x_3, \dots, x_k, \dots$ випадкових чисел, розподілених відповідно до (1), причому

$$F(x_i) = \int_{-\infty}^{x_i} f(x) dx = y_i, \quad i = 1, 2, \dots \quad (5)$$

Метод отримання випадкової послідовності із післядією. Розглянемо спосіб формування випадкової послідовності, яка має властивість самоподоби. Для генерації потоку з післядією використано розподіл випадкової величини Парето, який має важкий хвіст. Використовуємо (5) для отримання випадкових величин, розподілених згідно із законом Парето. Тоді:

$$F(x) = 1 - \left(\frac{k}{x}\right)^\alpha, \quad (6)$$

а рівняння (5) набуває вигляду

$$1 - \left(\frac{k}{x_i}\right)^\alpha = u_i. \quad (7)$$

Звідси маємо

$$\left(\frac{k}{x_i}\right)^\alpha = 1 - u_i, \quad \frac{k}{x_i} = (1 - u_i)^{\frac{1}{\alpha}}, \quad x_i = \frac{k}{(1 - u_i)^{\frac{1}{\alpha}}}. \quad (8)$$

Тепер, формуючи послідовність випадкових чисел u_i , рівномірно розподілених в інтервалі $[0, 1]$, та підставляючи їх у (8), розрахуємо шукану послідовність Парето-розподілених випадкових величин.

Метод моделювання впливу рівня самоподоби на випадковий трафік згідно до заданого параметру Херста. Запропоновано процедуру визначення залежності параметрів (α, k) Парето – розподілу та параметра Херста H [7]. Для заданого

значення параметра Херста використовуємо формулу автокореляційної функції для самоподібного процесу

$$r(\tau) = (1 + \tau)^{-(1-H)}. \quad (9)$$

Подальша послідовність дій така:

а) для сукупності часових інтервалів, що не перетинаються, формується обумовлена автокореляційною функцією послідовність корельованих випадкових величин, що задають кількість повідомлень у кожному інтервалі;

б) відповідно до отриманого розподілу числа пакетів у кожному інтервалі формується випадкова послідовність довжин проміжків між пакетами з післядією;

в) послідовність випадкових проміжків між моментами надходження пакетів, що виникає, утворює потік із заданим параметром самоподібності;

г) отриманий самоподібний потік статистично обробляється, у результаті будується гістограма відносних частот появи проміжків заданої довжини;

д) методом найменших квадратів здійснюється вибір відповідних параметрів Парето-розподілу, що апроксимує гістограму, які ставляться у відповідність до заданого значення. Н.

Далі описана процедура повторюється для нового значення Н. Результати, що отримуються при цьому, використовуються для відшукування залежності параметрів Парето – розподілу від чисельного значення параметра Н.

Висновки

Запропоновано процедуру формування самоподібного потоку на основі закону розподілу Парето. Рівень самоподібності одержуваного потоку визначається параметром Херста. Процедура може бути використана для опису трафіку при побудові імітаційної моделі функціонування інфокомунікаційної мережі.

Процедура формування самоподібного потоку заснована на генерації випадкових чисел відповідно до закону розподілу Парето. Цей розподіл вибраний через його властивість створювати довгі хвости, що є характерним для багатьох реальних систем. За допомогою параметра Херста визначається ступінь самоподібності потоку, що дозволяє моделювати різні сценарії трафіку. Представлені в роботі алгоритми та математичні інструменти, демонструють, як змінюється поведінка потоку при різних значеннях параметра Херста, що надає можливість краще зрозуміти і передбачити роботу інфокомунікаційних мереж.

Використання самоподібних потоків дозволяє більш точно відтворювати умови реальних мереж, що сприяє розробці ефективних алгоритмів та стратегій управління трафіком. Застосування параметра Херста для регулювання рівня самоподібності потоку додає гнучкості в моделюванні, дозволяючи адаптувати модель під специфічні потреби та умови експлуатації мережі.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Bhavya Mor, Sunita Garhwal & Ajay Kumar / A Systematic Review of Hidden Markov Models and Their Applications.
2. Pustovoytov, P. Assessment of QoS indicators of a network with UDP and TCP traffic under a node peak load mode. / Pustovoytov, P., Voronets, V., Voronets, O., Sokol, H., Okhrymenko, M. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2024. V 1. № 4(127). P. 23-31.
3. Пустовойтов П.Є. Модель вузла електронної комунікації, що обслуговує tcp-трафік / Воронець В.М., Пустовойтов П.Є. // Системи управління, навігації та зв'язку. Полтава, 2023. № 4(74). С. 152-155.
4. Will E. Leland, Walter Willinger, Murad S. Taqqu, Daniel V. Wilson / On the Self-Similar Nature of Ethernet Traffic (Extended Version) // IEEE/ACM Transactions on Networking, 1994.
5. Wojciechowski, Krzysztof, and Rafal Kruczek. The Hurst Parameter: Theory and Practice. Springer, 2020. ISBN 978-3-030-41411-6.
6. Zhen Chen, Yaping Li, Tangbin Xia, Ershun Pan / Hidden Markov model with auto-correlated observations for remaining useful life prediction // ScienceDirect, 2022. с.1-15.
7. G. Millán, "Estimation of Hurst exponent in self-similar traffic flows," 2021, arXiv:2103.08592.
8. Millán G., Lefranc G., Osorio-Comparán R. The Associative Multifractal Process: A Novel Model for Computer Network Traffic Flows // Computing Research Repository, 2021. – URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2106.14666>.

Received (Надійшла) 23.08.2024

Accepted for publication (Прийнята до друку) 30.10.2024

Method of mathematical modeling of self-similar traffic in infocommunication networks

Volodymyr Kompaniiets, Pavlo Pustovoytov

Abstract. This article presents a new approach to solving the problem of adequate network traffic modeling. A novel method is proposed that allows generating self-similar packet flows with an arbitrarily specified degree of self-similarity in infocommunication networks. The method is based on the use of the Pareto distribution and the maximum likelihood method for estimating model parameters. The obtained results can be used to build more realistic simulation models of infocommunication networks. The authors propose a mathematical apparatus method for the procedure of forming self-similar traffic, which consists in creating an accurate and efficient model that reflects the real properties of self-similarity in data flows. An effective tool for modeling complex network processes is proposed, allowing more accurate prediction of infocommunication network behavior and optimization of its operation. The article presents a procedure for forming self-similar traffic based on the Pareto distribution law. This law is chosen due to its ability to describe random variables with long tails, which is inherent in many real systems. The main parameter determining the level of flow self-similarity is the Hurst parameter, which allows flexible modeling of various traffic scenarios. The proposed procedure is an important tool for researchers and engineers engaged in modeling and analyzing network traffic, can be used to model traffic in infocommunication networks, contributing to improving the accuracy of reproducing real network operating conditions.

Keywords: self-similar traffic, Hurst parameter, Pareto distribution, method, infocommunication network.