УДК 681.324:621.325

О.О. Можаєв

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків

МОДЕЛЮВАННЯ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОГО ТРАФІКУ ГЕТЕРОГЕННОЇ МЕРЕЖІ НЕЛІНІЙНИМИ ДИНАМІЧНИМИ СИСТЕМАМИ

Проведено аналіз гетерогенної комп'ютерної мережі. Однією з основних рис трафіку гетерогенної мережі є суттєва нестабільність трафіку, його мінливість, яка є наслідком неузгодженої взаємодії складових частин інтегрального трафіку, які керуються різними програмно-апаратними засобами. Проведено моделювання фрактального процесу солітоноподібними функціями. В результаті проведених досліджень нелінійних динамічних систем встановлена можливість створити модель трафіку гетерогенної комп'ютерної мережі, заснована на його уявленні у вигляді солітоноподібних функцій, які є результатом вирішення нелінійних диференціальних рівнянь Кортевега-де Вріза.

Ключові слова: *гетерогенна мережа, телетрафік, солітони, гамильтована система, фрактальний процес, солітоноподібні функції, нелінійні динамічні системи, кноідальна хвиля.*

Вступ

Характер зміни і взаємодії телекомунікаційного трафіку в гетерогенній комп'ютерній мережі передачі даних викликає значний інтерес. Цей інтерес обумовлений по-перше широкою розповсюдженістю таких мереж (це глобальні мережі передачі даних, мережі передачі даних спеціального призначення, мережі, обслуговуючі різні державні, міждержавні установи, мережі передачі крупних корпорацій і фірм, а також багато інших). Однією з основних рис трафіку гетерогенної мережі є суттєва нестабільність трафіку, його мінливість, яка є наслідком неузгодженої взаємодії складових частин інтегрального трафіку, які керуються різними програмно-апаратними засобами. Зразки такої взаємодії представлені в ряді робіт [1 – 4]. У цих статтях проводиться моделювання трафіку гетерогенної мережі, як системи масового обслуговування з врахуванням фрактального характеру трафіку. Але, у відомих на даний момент часу роботах, не приводяться моделі трафіку, як результат функціонування складної нелінійної динамічної системи, якій і є процес передачі даних в гетерогенній телекомунікаційній мережі. Для вивчення складних нелінійних динамічних систем в даний час запропоновано значне число нових математичних і фізичних теорій [5 – 8], які ще не в повному ступені знайшли своє місце в теорії передачі інформації, теорії телетрафіка, теорії телекомунікації. Так представлення особливостей трафіку гетерогенної мережі у вигляді відокремлених (солітоноподібних) хвиль дозволить створити модель процесу передачі даних, що враховує причини і передвісники різких сплесків інтенсивності трафіку, які є основними причинами нерівномірності передачі інформації, втрати частини інформації і різкого збільшення часу передачі. Таким чином виникає актуальне завдання нового підходу до моделювання процесу пакетного трафіку в гетерогенних мережах на основі вивчення нелінійних динамічних коливальних систем із стохастичними параметрами.

Метою даної статті є представлення пакетного телекомунікаційного трафіку гетерогенної мережі, як нелінійної динамічної системи із стохастичними параметрами, що дозволить створити модель процесу передачі даних, яка враховує особливості поведінки пікових (найбільш навантажених) ділянок телекомунікаційного трафіку.

Основна частина

У даній статті основна увага буде присвячена рівнянню Картевега-де Вріза (скорочено називатимемо рівнянням КДВ). Рівняння КДВ – це нелінійне диференціальне рівняння в приватних похідних, яке можна уявляти у вигляді

$$u_t - 6uu_x + u_{xxx} = 0\,. \qquad (1)$$

Фізично змінну u можна визначити як відхилення від рівноважного стану значення деякої величини (висота, швидкість, щільність і так далі). У нашому випадку під цією змінною краще всього передбачати параметри телекомунікаційного трафіку такі наприклад, як інтенсивність трафіку, розмір вікна протоколів транспортного рівня або кількість втрачених пакетів даних.

Особливістю рівняння КДВ є те, що воно інтегрується і має розв'язання у вигляді стаціонарних хвиль, що біжать, а саме відокремленої хвилі у вигляді:

$$u(x,t) = -\frac{1}{2}a^2\mathrm{sch}^2\left[\frac{1}{2}a(x - x_0 - at^2\right] \qquad (2)$$

і періодичної кноідальної хвилі, яка може бути виражена через еліптичні функції Якобі. Відокремлені хвилі утворюють однепараметрічне сімейство рішень у формі імпульсів, швидкість переміщення яких a^2 пропорційна амплітуді, а ширина $1/a$ зворотнопропорційна квадратному Корню з амплітуди. Таким чином, вищі відокремлені хвилі розповсюджуватимуться швидше низьких.

На рис. 1 представлені основні властивості солітонів як вирішень рівняння КДВ. У загальному випадку довільне локалізоване обурення для рівняння КДВ розділяється на дві частини: солітони, що розповсюджуються направо і осцилююча хвиля з амплітудою, затухаючою у часі, що розповсюджується вліво

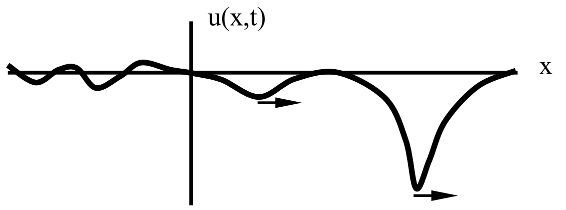


Рис. 1. Основні властивості солітонів

Для подальших теоретичних досліджень солітоноподібних рішень рівняння КДВ і зіставлення цих рішень з процесом передачі даних в гетерогенній мережі на рис. 2 представимо графіки реалізацій трафіку в мережі.

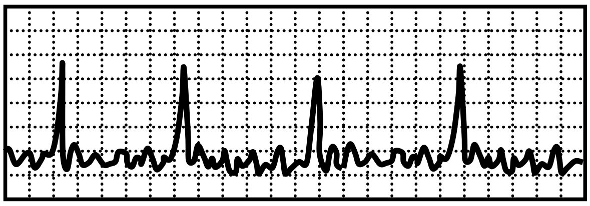


Рис. 2. Графік реалізації трафіку

Зіставлення графіків на малюнках 1 і 2 показує те, що характер змін реального трафіку можна зіставити із поведінкою вирішення рівняння КДВ з урахуванням специфіки початкових і граничних умов.

Таким чином, виникає теоретична можливість вивчення властивостей трафіку і прогнозу його поведінки (рівень інтенсивності, кількість втрачених пакетів та інші) на основі моделювання процесу передачі пакетів в гетерогенній мережі, як нелінійної динамічної системи в якій розповсюджуються солітоноподібні обурення.

Вирішення рівняння Картевега-де Вріза. Для успішного моделювання необхідно проаналізувати методи вирішення рівнянь КДВ і застосовність використання цих методів.

Припустимо, що наявність солітонних вирішень рівняння КДВ тісно пов'язана з існуванням нескінченної послідовності поліномінальних законів збереження, що мають вигляд:

$$T_t + X_x = 0, \qquad (3)$$

де щільність, що зберігається T та потік X деякої величини є поліномінальними функціями змінної u та її похідних по x. Очевидно, що рівняння КДВ само може бути записане у вигляді закону збереження:

$$u_t + \left[-3u^2 + u_{xx}\right]_x = 0. \qquad (4)$$

Наступні дві щільність, що зберігається, в цій послідовності такі:

$$T_2 = u^2; \quad T_3 = u^3 + \frac{1}{2}u_x^2, \qquad (5)$$

а у подальші щільністі, що зберігається, включають похідні вищого порядку. Приведемо доказ існування нескінченного ряду таких величин.

Якщо в рівнянні 1 квадратичний закон взаємодії потоків замінити кубічним, то хвилі можуть бути описані модифікованим рівнянням КДВ:

$$v_t - 6v^2 v_x + v_{xxx} = 0. \qquad (6)$$

Модифіковане рівняння КДВ також володіє нескінченною послідовністю поліномінальних законів збереження; проте рівняння загального класу

$$w_t - 6w^p w_x + w_{xxx} = 0; \quad p = 3, \quad 4, \quad 5, ... \qquad (7)$$

мають тільки по три поліномінальних закону збереження.

Наявність нескінченних послідовностей законів збереження для рівняння КДВ і модифікованого рівняння КДВ приводить до припущення існування зв'язку між вирішеннями цих рівнянь.

Якщо v – рішення модифікованого рівняння КДВ:

$$Qv \equiv v_t - 6v^2 v_x + v_{xxx} = 0, \qquad (8)$$

то

$$u \equiv v^2 + v_x \qquad (9)$$

є рішення рівняння КДВ

$$Pu \equiv u_t - 6uu_x + u_{xxx} = 0. \qquad (10)$$

Підставимо вираз (9) в ліву частину рівняння (10) і отримаємо

$$Pu = \left(2v + \frac{\partial}{\partial x}\right)Qv \qquad (11)$$

так, що якщо $Qv = 0$ те u задовольняє рівнянню КдВ. Перетворення (9) зв'язує два нелінійні рівняння. Скористаємося ним для отримання інформації про точне вирішення рівняння КДВ при $-\infty < x < \infty$ та $t > 0$ з початковими умовами:

$$u(x,t) = f(x); \quad -\infty < x < \infty, \qquad (12)$$

де $f(x)$ – функція, яка задовольняє умовам:

$$\sum_{i=1}^{4}\int_{-\infty}^{\infty}\left|\frac{\partial^{i} f(x)}{\partial x_{i}}\right|dx<\infty\,; \qquad (13)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} 1+|x|\ |f(x)|dx<\infty\,, \qquad (14)$$

які забезпечують наявність класичного рішення.

Можна відзначити, що рівняння КДВ інваріантне відносно перетворень координат, що дозволяє проводити відповідні заміни змінних. Тоді скориставшись перетворенням (9) рівняння КДВ:

$$\psi_{xx} - \ u-\lambda\ \ \psi = 0\,. \qquad (15)$$

Поклавши $\lambda = k^2$, представимо хвилеву функцію ψ як залежну від просторової координати x (у випадку передачі даних в мережах її еквівалент поточний час). Тоді асимптотична поведінка хвилевої функції, що є рішенням рівняння КДВ можна представити у вигляді:

$$\psi(x,t)\sim\begin{cases} e^{-ikx}+b(k)e^{ikx}, & \text{при } x\to\infty\,; \\ a(k)e^{-ikx}, & \text{при } x\to-\infty\,. \end{cases} \qquad (16)$$

За цими даними побудуємо функцію:

$$B(\zeta)=\sum_{n=1}^{N}c_n^2 e^{-\chi_n\zeta}+\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}b(k)e^{ik\zeta}dk, \qquad (17)$$

де сума відповідає внеску дискретного спектру, а інтеграл Фурьє – внеску безперервного спектру. У подальшому після підстановки цієї функції в лінійне інтегральне рівняння Гельфанда-Левітана-Марченко:

$$K(x,y)+B(x+y)+\int_{x}^{\infty}B(y+z)K(x,z)dz=0, \qquad (18)$$

і вирішивши його, знайдемо вирішення рівняння КДВ

Вирішення рівняння КДВ залежить від можливості вирішити лінійне рівняння Гельфанда-Левітана-Марченко (ГЛМ). У випадку якщо таке рішення існує, то вирішення рівняння КДВ можна представити у вигляді:

$$u(x,t)=-2\frac{\partial}{\partial x}K(x,x;t). \qquad (19)$$

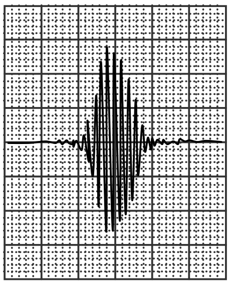
Перевага цього рішення в тому, що вираз (19) є лінійним рівнянням з однією незалежною змінною, у той час. коли початкове рівняння КДВ є нелінійним диференціальним рівнянням в часткових похідних.

Детальний асимптотичний аналіз цих рівнянь показує, що такі рішення є чисто солітоними тобто існує однозначна відповідність між власними значеннями і параметрами солітонів.

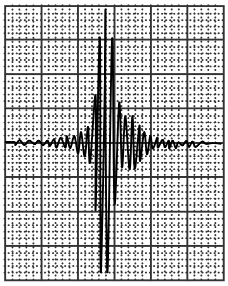
Крім того, можна показати, що рівняння КДВ є повністю інтегрованою гамильтоновою системою. Таким чином нами було встановлено, що існує можливість провести моделювання фрактального процесу передачі даних в гетерогенній мережі за допомогою нелінійних динамічних систем, що описуються нелінійними рівняннями КДВ, з урахуванням умов, які є характерними при обміні даними.

Моделювання фрактального процесу солітоноподібними функціями.

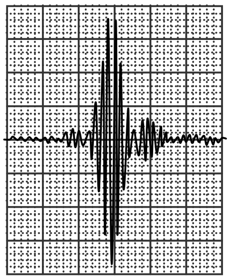
Для моделювання процесу передачі пакетних даних у гетерогенній мережі, трафик якого має фрактальні особливості, автором запропоновано використання рівнянь КДВ з параметрами, початковими та кінцевими умовами, які є характерними для трафіку. На рис.3 наведені графіки змодельованих процесів передачі даних на ділянці мережі.



а



б

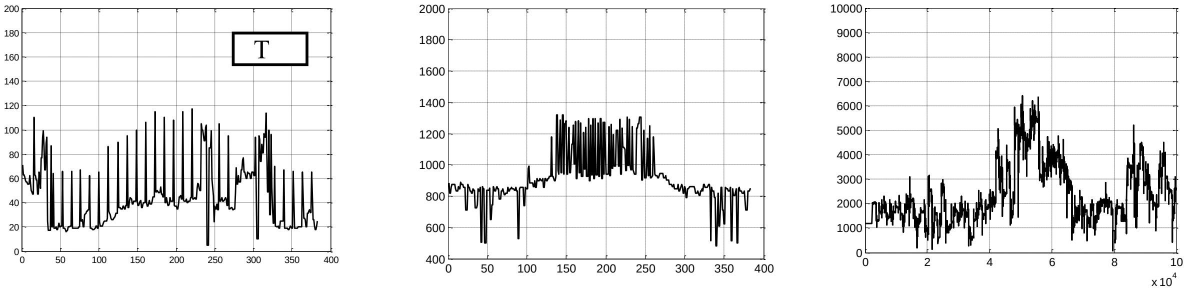


в

Рис. 3. Графіки змодельованих процесів передачі даних на ділянці мережі

У подальшому дослідженні було проведено вивчання статистичних характеристик трафіку, який був змодельований. Аналіз статистичних характеристик трафіку визначив, що значення показника Херста знаходиться в межах Н=0,73-0,86, що підтверджує фрактальні властивості отриманих моделей. Ці показники не набагато відрізняються від показників, які отримані за допомогою інших моделей [10 – 12]. На рис. 4, а – 4, в представлені графіки реальних телекомунікаційних трафіків гетерогенної мережі передачі даних, які перетворені в простір MatLab. Розраховані значення показника Херста для реального трафіку знаходяться в межах Н=0,71-0,89, що також підтверджує коректність запропонованої моделі.

Але основна перевага моделювання фрактального процесу як нелінійної динамічної системи, це можливість визначення форми, інтенсивності і тривалості максимальних флуктуацій реального трафіку по поведінці моделі. Аналіз, проведений по методу найменших квадратів, показав, що модель, яка запропонована, приблизно на 12% точніше відображає характер найбільш мінливих ділянок телекомунікаційного трафіку (ізольовані піки або горби, їх амплітуду та тривалість) в порівнянні з моделями, що існують, в теж час зберігаючи прийнятна відповідність з реальним трафіком і існуючими моделями по такої характеристики трафіку, як показник Херста.



а б в

Рис. 4. Графіки реальних телекомунікаційних трафіків гетерогенної мережі

Висуjdrи

В результаті проведених досліджень нелінійних динамічних систем встановлена можливість створити модель трафіку гетерогенної комп'ютерної мережі, заснована на його уявленні у вигляді солетоноподібних функцій, які є результатом вирішення нелінійних диференціальних рівнянь Кортевега – де Вріза. У статті проведений аналіз вирішуваної рівнянь КДВ і застосовності їх для моделювання поведінки фрактального трафіку. Найбільший виграш у використанні такої моделі (до 12%) можна отримати у разі вивчення і прогнозування поведінки найбільш мінливих ділянок телекомунікаційного трафіку (ізольовані списки або горби, їх амплітуда і тривалість) в порівнянні з тими, що існують, в теж час зберігаючи прийнятна відповідність з реальним трафіком і існуючими моделями по такої характеристики трафіку, як показник Херста.

Список літератури

1. *Tutschku K., Leskien T., Tran-Gia P. Traffic estimation and characterization for the design of mobile communication networks // COST257TD(97)47, 1997. – 460 p.*

2. *Schuster H.G. Deterministic Chaos: An Introduction. VCH, NewYork, 1988.2nd Edition. – 360 p.*

3. *Фрактальный анализ процессов, структур и сигналов: Коллективная монография // Г.А. Кучук, А.А. Можаев, Р.Э. Пащенко, К.М. Рук кас и др. – Х.: ЭкоПерспектива, 2006. – 360 с.*

4. *Кучук Г.А. Управління трафіком мультисервісної розподіленої телекомунікаційної мережі // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2007. – Вип. 2. – С. 18-27.*

5. *Можаєв О.О. Моделювання трафіка телекомунікаційних мереж на базі масштабної інваріантності // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – Х.: ХУ ПС, 2006. – Вип. 6(12). – С. 79-82.*

6. *Можаев А.А. Оценка достоверности определения параметров телекоммуникационнного трафика // Системи обробки інформації. – Х.: ХУ ПС, 2006. – Вип. 9(58). – С. 53-55.*

7. *Кучук Г.А., Можаев А.А. Прогнозирование трафика для управления перегрузками интегрированной телекоммуникационной сети // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2007. – № 8 (27). – С. 261-271.*

Надійшла до редколегії 29.09.2008

Рецензент: д-р техн. наук, проф. О.І. Стрелков, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОГО ТРАФФИКА ГЕТЕРОГЕННОЙ СЕТИ НЕЛИНЕЙНЫМИ ДИНАМИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ

А.А. Можаев

Проведен анализ гетерогенной компьютерной сети. Одной из основных черт траффика гетерогенной сети есть существенная нестабильность траффика, его изменчивость, которая является следствием несогласованного взаимодействия составных частей интегрального траффика, которые руководствуются разными программно-аппаратными средствами. Проведено моделирование фрактального процесса солиоподобными функциями. В результате проведенных исследований нелинейных динамических систем установлена возможность создать модель траффика гетерогенной компьютерной сети, основанная на его представлении в виде солитоподобных функций, которые являются результатом решения нелинейных дифференциальных уравнений Кортевега-де Вриза.

Ключевые слова: *гетерогенная сеть, траффик теле, солитони, гамильтованная система, фрактальный процесс, солитоподобныеі функции, нелинейные динамические системы, кноидальна волна.*

DESIGN OF TELECOMMUNICATION TRAFFIC OF HETEROGENEOUS NETWORK BY THE NONLINEAR DYNAMIC SYSTEMS

A.A. Mozhaev

The analysis of heterogeneous computer network is conducted. One of basic lines of traffic of heterogeneous network is substantial instability of traffic, his changeability, which is investigation of uncoordinated co-operation of component parts of integral traffic, which follow different hardware-softwarefacilities. The design of fractal process is conducted soliton-like functions. As a result of the conducted researches of the nonlinear dynamic systems possibility to create model of traffic of heterogeneous computer network, based on his presentation as soliton-like functions which are the result of decision of nonlinear differential equalizations of Kortevega-de Vriza is set.

Keywords: *heterogeneous network, traffic body, solitons, hamiltonion system, fractal process, soliton-like functions, nonlinear dynamic systems, кноидальна wave.*