DOI: 10.18372/2310-5461.40.13224

УДК 004.942(045)

О. А. Ладигіна
Центральноукраїнський національний технічний університет
orcid.org/0000-0003-2886-2238
e-mail:ladyginaoa@ukr.net

ВЕРИФІКАЦІЯ МОДЕЛЕЙ НЕСТАЦІОНАРНОГО ПОЛІНОМАЛЬНОГО ТРАФІКУ

Вступ

Створення довершених адекватних моделей трафіку є актуальним завданням, оскільки в результаті одержання необхідна інформація, використовується потім як початкові дані для розрахункових алгоритмів, використовуваних в загальній мережевій моделі [1].

Постановка проблеми та огляд останніх досліджень і публікацій

Особливої значущості набуває також завдання перевірки коректності моделей, відповідності їх поведінці різнорідної системи з властивістю змінності. Складність завдання пов'язана ще з особливостями мережі: гетерогенністю, динамікою процесів, вимогами до якості обслуговування трафіка [2]. Основна ідея підходу полягає в тому, що під час контрольованого виконання автоматично порівнювати фактичну поведінку трафіку з еталонною поведінкою, яка задається у вигляді моделі, а при відхиленні від еталону забезпечити необхідне реагування з боку інструментального середовища контрольованого виконання [3]. Верифікація моделей трафіку з еталонними моделями проводиться за допомогою вибраних критеріїв і показників адекватності. Як критерій показників, використовуються цільові функціонали, які визначають точність і достовірність моделювання трафіку [4].

Постановка завдання (мета статті)

Загальна постановка завдання верифікації, як задачі аналізу адекватності моделей нестаціонарного трафіку еталонному трафіку, така.

Відомі гаусівські закони розподілу випадкових параметрів поліноміального подання еталонного трафіку [3].

Методами теорії наближення функцій та математичного програмування потрібно оцінити ступінь адекватності відображення перших двох моментів еталонного нестаціонарного трафіку вдосконаленими моделями квантування і марковській апроксимації розмірності $n = 3$ і $n = 4$ з використанням метрики простору Евкліда в дискретному випадку і простору Гільберта в неперервному випадку.

Розв'язання завдання

Типова методика верифікації розглядається на прикладі поліноміального трафіку [3]. В ній використовується такий загальний типовий алгоритм розв'язання задач:

1. Нормування та приведення до безрозмірного вигляду діапазону зміни реалізацій обвідної поліноміального трафіку і інтервалу його нестаціонарні. Це дозволяє моделювати динаміку трафіку в «одиничному квадраті» з координатами вершин: (0,0), (0,1), (1,0), (1,1).
2. Вибір розмірності моделі n, тобто можливого числа дискретних станів нестаціонарного трафіку. Це число показує, на скільки квантів поділяється одиничний квадрат для ступінчастої апроксимації нестаціонарного трафіку.
3. Визначення безрозмірних нормованих інтенсивностей зміни станів трафіком. Інтенсивності переходів визначаються як інтенсивності перетину трафіком заданих рівнів квантування.
4. Побудова логіко-математичної моделі динаміки трафіку у вигляді графа, вершинами якого слугують стани трафіку, а спрямовані ребра — стрілки з вказівкою напрямків зміни станів трафіком.
5. Складання по логіко-математичної моделі динаміки трафіку диференціальних рівнянь Колмогорова–Чепмена щодо ймовірностей станів трафіку.
6. Вибір системи початкових умов для вирішення задачі Коші за допомогою складених диференціальних рівнянь динаміки трафіку.
7. Пряме перетворення системи Лапласа диференціальних рівнянь у систему алгебричних рівнянь щодо зображень імовірностей станів трафіку при початкових умовах п. 6.
8. Розв'язання отриманої системи алгебричних рівнянь щодо зображень імовірностей станів трафіку методом Гауса або методом перетворення матриці системи до трикутного вигляду з урахуванням умови нормування для невідомих зображень.
9. У разі необхідності перетворення методом невизначених коефіцієнтів зображень до вигляду

сум раціональних дробів, зручних для пошуку оригіналів в зворотному перетворенні Лапласа.

10. Виконання зворотного перетворення Лапласа для отриманих зображень імовірностей.

11. Використання ймовірностей станів і квантованих значень трафіку для визначення математичного сподівання і дисперсії обвідної нестаціонарного гаусовського трафіку.

12. Розв'язання системи рівнянь оптимізації квантованих значень трафіку з метою досягнення найкращого наближення модельних і еталонних моментів трафіку.

13. Визначення графоаналітичним ітераційним методом оптимальних значень нормованих інтенсивностей.

14. Обґрунтування і вибір критеріїв адекватності, визначення ступеня адекватності моделі еталонному трафіку за обраними критеріями.

15. Аналіз результатів порівняння характеристик модельного і еталонного трафіків і виявлення закономірностей моделювання та формулювання висновків.

За цією методикою з необхідним рівнем деталізації кроків 1–15 алгоритму вирішується завдання верифікації поліноміального трафіку при $n = 3$ та $n = 4$.

Основними критеріями на прийнятому рівні розгляду служать точкові і інтервальні оцінки конкордації між собою модельних і еталонних значень моментів нестаціонарного трафіку.

Для дискретного випадку введено середнє значення критерію конкордації моделі і еталону нестаціонарного трафіку вигляду:

$$\rho 0(Z_1, Z_2) = \sum_{t_k=0}^{1} \frac{2m(t_k)M(t_k)}{m(t_k)^2 + M(t_k)^2}. \qquad (1)$$

Для безперервного випадку введено інтегральний критерій конкордації моделі і еталону нестаціонарного трафіку вигляду:

$$\rho 0(Z_1, Z_2) = \int_0^1 \frac{2m(t_k)M(t_k)}{m(t_k)^2 + M(t_k)^2} dt_k. \qquad (2)$$

Значення інтегральних показників розглядаються як песимістичні оцінки адекватності моделі і еталону нестаціонарного трафіку, а значення показника конкордації середніх значень трафіку на інтервалі нестаціонарності — як оптимістичну оцінку адекватності моделі і еталону нестаціонарного трафіку.

Для характеристики цих втрат доцільно ввести показник неадекватності моделі і еталону нестаціонарного трафіку вигляду:

$$\pi 3 = 1 - \rho 0(Z10, Z20, Z30). \qquad (3)$$

Показник конкордації середніх значень трафіку на інтервалі нестаціонарності вигляду:

$$r0(t_k) = \frac{2m0M0(t_k)}{m0^2 + M0(t_k)^2}. \qquad (4)$$

Отже звідси випливає, що з використанням показника конкордації середніх значень трафіку на інтервалі нестаціонарності застосовують інтервальну оцінку адекватності. Але цей показник є нелінійний і зворотно пропорційний ступеню адекватності, тому більш зручними є точкові оцінки адекватності і неадекватності моделі і еталону нестаціонарного трафіку.

Використовуючи (3), введено показники адекватності вигляду:

$$I_{cr}(Z_1, Z_2, Z_3) = [\rho 0(Z_1, Z_2, Z_3), r0(Z_1, Z_2, Z_3)]; \qquad (5)$$

$$\rho r0(Z_1, Z_2, Z_3) = (\rho 0\,(Z_1, Z_2, Z_3) + r0\,(Z_1, Z_2, Z_3))/2; \qquad (6)$$

$$\pi 0 = 1 - \rho r0\,(Z_1, Z_2, Z_3). \qquad (7)$$

Якщо модель адекватна еталону, то верифікацію закінчують, у протилежному випадку повторно перевіряють початкові дані, початкові умови для інтенсивностей станів трафіку, вимоги до критеріїв оптимальності, показники системи верифікації, еталонні значення показників адекватності моделі і еталону.

Приклад. Результати розрахунку значення показника (1) для оптимізованої в просторі Евкліда моделі при $m = 10$ та значення показника (2) для оптимізованої в просторі Гільберта моделі при $m = 10$ зведені в табл. 1 і показані на рис. 1.

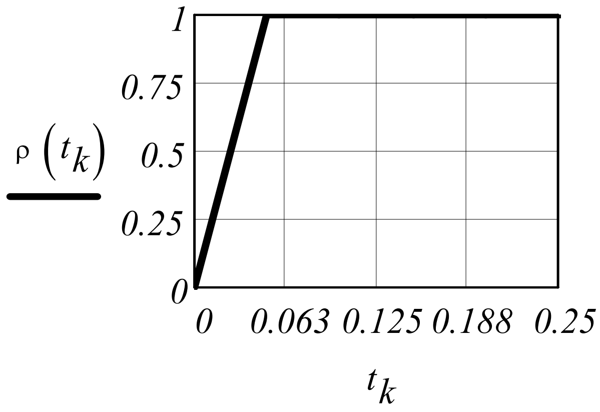
Аналізуючи дані табл. 1 та рис. 1 можна зробити висновок, що оптимізовані моделі достатньо точно відображають еталонний трафік, особливо в другій половині інтервалу нестаціонарності.

Таблиця 1

Результати порівняння адекватності моделювання *n=3* в просторах Евкліда і Гільберта

t_k	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
$\rho_{k\text{ä}}$	0	$0,9^5240$	$0,9^2770$	$0,9^2670$	$0,9^2750$	$0,9^2873$	$0,9^3618$	$0,9^4689$	$0,9^4873$	$0,9^4643$	1,0
$\rho_{k\text{í}}$	0	$0,9^2571$	$0,9^3402$	$0,9^457$	$0,9^3738$	$0,9^3816$	$0,9^467$	$0,9^54$	$0,9^445$	$0,9^451$	$0,9^6$

1. Для дискретного випадку, *a*



2. Для безперервного випадку, *b*

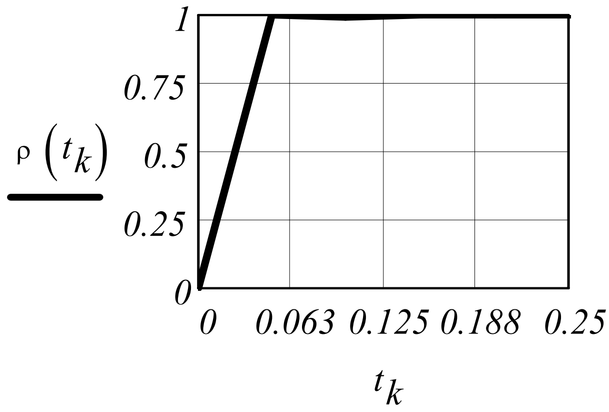


Рис. 1. Залежність показника конкордації від часу

Виконуючи інтеграцію середнього значення дискретного критерію (1) для оптимізованої в просторі Евкліда моделі, одержують $\rho 0(t_k) = 1,0$.

Виконуючи інтеграцію значення інтегрального критерію (2) для оптимізованої в просторі Гільберта моделі, одержують $\rho 0(t_k) = 0,990799$.

Отримані значення критеріїв (1), (2) показують непогане узгодження моделей і еталону нестаціонарного трафіку. Аналізуючи ці значення спільно з даними табл. 1 і графіками рис. 6 можна зробити висновок, що «втрати адекватності» в переважно зумовлені малою відповідністю початкових значень трафіку.

Використовуючи набутого значення $\rho 0(t_k) = 1,0$ і $\rho 0(t_k) = 0,990799$ за формулою (3) знаходимо, що $\pi 3 = 0$ і $\pi 3 = 0,009201$. З цього випливає, що в середньому оптимізована модель для дискретного випадку на 0 % неадекватна еталону, для безперервного випадку на 0,9201 % неадекватна еталону. Ці величини добре узгоджуються із значеннями коефіцієнта варіації погрішностей моделювання. При розрахунку значення показника конкордації середніх значень трафіку (4) на інтервалі нестаціонарної для оптимізованої в просторі Евкліда і в просторі Гільберта моделі одержують $r0(Z_1, Z_2, Z_3) = 0,923077$.

Використовуючи отримані результати для розрахунку показників адекватності (5)–(7), одержуємо:

1. Для дискретного випадку:

$$I_{cr}(Z_1, Z_2, Z_3) = 1 - 1 = 0;$$

$$\rho r0(Z_1, Z_2, Z_3) = (1 + 0,923077)/2 = 0,9615385;$$

$$\pi 0 = 1 - 0,9615385 = 0,038462.$$

2. Для безперервного випадку:

$$I_{cr}(Z_1, Z_2) = 1 - 0,990799 = 9,201 \cdot 10{-}3;$$

$$\rho r0(Z_1, Z_2)\, Z_3) = (0,990799 + 0,923077)/2 = 0,956938;$$

$$\pi 0 = 1 - 0,956938 = 0,043062.$$

Аналогічно проведені розрахунки для моделі розмірності $n = 4$ і результати зведені в табл. 2, а також відображені на рис. 2.

Отримане значення показує хороше узгодження моделей і еталону нестаціонарного трафіку. Втрати адекватності незначні і обумовлені, в основному, невеликими невідповідностями початкових значень трафіку.

Таблиця 2

Результати порівняння адекватності моделювання *n* = 4 в просторах Евкліда і Гільберта

t_k	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
$\rho_{k\text{д}}$	0	-0,46461	0,42036	0,82649	0,94866	0,98380	0,99433	0,99776	0,99908	0,99974	1
$\rho_{k\text{н}}$	0	0,93837	0,94533	0,94880	0,954778	0,94852	0,95733	0,95676	0,94871	0,95875	0,94370

1. Для дискретного випадку, *a*

2. Для безперервного випадку, *b*

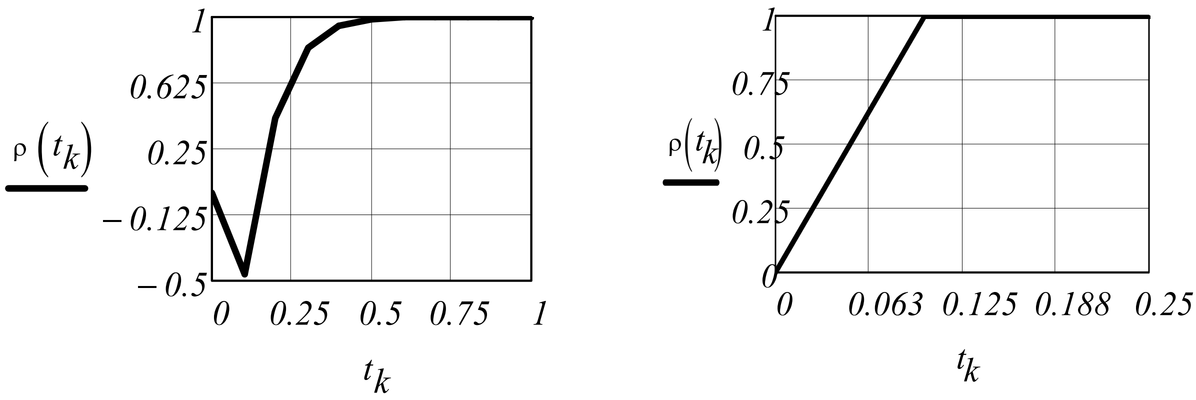


Рис. 2. Залежність показника конкордації від часу

Висновки

За наслідками аналізу і порівняння початкових моментів модельного і еталонного трафіків при n = 3 і n = 4 можна укласти, що із зростанням порядку моделей нестаціонарного трафіку збільшується точність моделювання трафіку, особливо у випадках коли порядок моделей перевищує порядок полінома, а також що на початкових інтервалах часу слід використовувати малорозмірні моделі. При n = 4 досягається майже повна адекватність моделювання початкового моменту нестаціонарного трафіку, особливо в безперервному випадку. Пропоновані система показників і методика верифікації моделей нестаціонарного трафіку з різним числом станів трафіку є чутливою до параметра розмірності моделей n і дозволяє виконувати верифікацію моделей різної розмірності, використовувати уточнені кількісні оцінки ступеня адекватності моделей реальному трафіку. Розглянуто процедуру верифікації моделей відносно проста, легко автоматизується для використання сучасних обчислювальних засобів, може знайти застосування в інтелектуальних системах оптимального вимірювання трафіку телекомунікаційних мереж, а також в системах оптимального обслуговування трафіку.

ЛІТЕРАТУРА

1. **Ігнатов В. О.,** Гузій М. М., Ладигіна О. А. Оптимізація моделей нестаціонарного поліноміального трафіку комп'ютерної мережі. *Проблеми інформатизації та управління*: зб. наук. пр.— К. : НАУ, 2014. №3(47). С. 36–40.

2. **Симоненко А. В.,** Хайлан Ахмад Али. Модель динамического управления очередями и пропускной способности канала связи на маршрутизаторах мультисервисной сети. *Радиотехника*: всеукр. межвед. науч.-техн. сб. 2008. Вып. 155. С. 164–168

3. **Ладигіна О. А**. Синтез методу верифікації моделей нестаціонарного трафіку в гетерогенних мережах. *Комп'ютерні системи та мережні технології*: ІІІ Міжнародна науково-технічна конференція (15–17 червня 2010 р.): збірн. тез. К. : НАУ, 2010. С. 78

4. **Ігнатов В.О**., Гузій М. М., Ладигіна О. А. Верифікація моделей нестаціонарного трафіку комп'ютерних мереж. *Комп'ютерні системи та мережні технології*: VI міжнародна науково-технічна конференція (11–13 червня 2013 р.): збірн. тез. К. : НАУ, 2013. С. 64.

Ладигіна О. А.
ВЕРИФІКАЦІЯ МОДЕЛЕЙ НЕСТАЦІОНАРНОГО ПОЛІНОМІАЛЬНОГО ТРАФІКУ

Мета роботи полягає в тому, щоб виконати експериментальне дослідження моделей оптимального оцінювання поліноміального трафіку в гетерогенних комп'ютерних мережах. Для досягнення мети дослідження ставляться і вирішуються задачі верифікації моделей трафіку при різної розмірності поліноміального трафіку. Процедура верифікації розуміється як перевірка адекватності моделей трафіку еталонним моделям за допомогою обраних критеріїв і показників адекватності, у ролі яких використані цільові функціонали, які визначають точність і достовірність моделювання трафіку. Основними критеріями служать точкові та інтервальні оцінки конкордації (узгодженості) між собою модельних і еталонних значень моментів поліноміального трафіку. Моделі нестаціонарного трафіка в гетерогенних комп'ютерних мережах побудовані методом квантування і марковській апроксимації та методом найменших квадратів. Багатомірний закон розподілу всіх значень агрегованого трафіку на інтервалі нестаціонарності передбачається гаусовим. Для оцінювання точності апроксимації трафіку вводиться поняття еталонного трафіку і використовується порівняння перших двох моментних характеристик обвідної модельного і еталонного трафіків. Це дозволяє порівнювати багатомірні гаусовські розподіли еталонного та модельного нестаціонарного трафіку. Збільшення розмірності моделей супроводжується зростанням точності апроксимації нестаціонарного трафіку. Запропонована система показників і методика верифікації моделей нестаціонарного трафіку з різним числом станів трафіку дозволяють з необхідним ступенем повноти виконувати верифікацію моделей. Наведені розрахунки критеріїв верифікації *моделей нестаціонарного поліноміального трафіку розмірності n = 3 і n = 4 в гетерогенних комп'ютерних мережах у дискретному випадку з використанням метрики простору Евкліда і простору Гільберта в безперервному випадку. Отримані результати дозволяють виявити загальні закономірності росту точності апроксимації трафіку (ступеня адекватності моделей) в залежності від збільшення розмірності моделей та обсягів вибірок.*

Ключові слова: нестаціонарний трафік; верифікація моделей трафіку; гетерогенні комп'ютерні мережі; простір Евкліда; простір Гільберта.

Ladygina O. A.

VERIFICATION OF NONSTATIONARY POLYNOMIAL TRAFFIC MODELS

In this paper, we perform an experimental study of models for the optimal estimation of polynomial traffic in heterogeneous computer networks. To achieve the goal of the study, the tasks of verification of traffic models with different dimensions of polynomial traffic are set and solved. The verification procedure is understood as checking the adequacy of traffic models to reference models using selected criteria and adequacy indicators, in the form of which target functionals are used, which determine the accuracy and reliability of traffic modeling. The main criteria are point and interval estimates of concordance (consistency) among themselves of model and reference values of moments of polynomial traffic. Models of non-stationary traffic in heterogeneous computer networks are built using the quantization and Markov approximation methods and the least squares method. The multidimensional normal distribution of all values of aggregated traffic in the nonstationary interval is assumed to be Gaussian. To assess the accuracy of the approximation of traffic, the concept of reference traffic is introduced and a comparison of the first two moment characteristics of the bypass model and reference traffic is used. This allows you to compare multidimensional Gaussian distributions of reference and model unsteady traffic. An increase in the dimensionality of the models is accompanied by an increase in the accuracy of approximation of non-stationary traffic. The proposed system of indicators and methods of verification of models of non-stationary traffic with a different number of traffic states allow you to verify models with the necessary degree of completeness. The calculations of the verification criteria for models of nonstationary polynomial traffic of dimension n = 3 and n = 4 in heterogeneous computer networks in the discrete case using the Euclidean and Hilbert space metrics in the continuous case. The obtained results make it possible to identify general patterns of growth in the accuracy of traffic approximation (degree of model adequacy) depending on the increase in the dimension of the models and sample sizes.

Keywords: non-stationary traffic; verification of traffic patterns; heterogeneous computer network; Euclidean space; Hilbert space.

Ладыгина О. А.

ВЕРИФИКАЦИЯ МОДЕЛЕЙ НЕСТАЦИОНАРНОГО ПОЛИНОМИАЛЬНОГО ТРАФИКА

В данной работе выполняется экспериментальное исследование моделей оптимального оценивания полиномиального трафика в гетерогенных компьютерных сетях. Для достижения цели исследования ставятся и решаются задачи верификации моделей трафика при различной размерности полиномиального трафика. Процедура верификации понимается как проверка адекватности моделей трафика эталонным моделям с помощью выбранных критериев и показателей адекватности в качестве которых использованы целевые функционалы, которые определяют точность и достоверность моделирования трафика. Основными критериями служат точечные и интервальные оценки конкордации (согласованности) между собой модельных и эталонных значений моментов полиномиального трафика. Модели нестационарного трафика в гетерогенных компьютерных сетях построены методом квантования и марковской аппроксимации и методом наименьших квадратов. Многомерный нормальный закон распределения всех значений агрегированного трафика на интервале нестационарности предполагается гауссовым. Для оценки точности аппроксимации трафика вводится понятие эталонного трафика и используется сравнение первых двух моментных характеристик обводной модельного и эталонного трафиков. Это позволяет сравнивать многомерные гауссовские распределения эталонного и модельного нестационарного трафика. Увеличение размерности моделей сопровождается ростом точности аппроксимации нестационарного трафика. Предложенная система показателей и методика верификации моделей нестационарного трафика с различным числом состояний трафика позволяют с необходимой степенью полноты выполнять верификацию моделей. Приведенные расчеты критериев верификации моделей нестационарного полиномиального трафика размерности n = 3 и n = 4 в гетерогенных компьютерных сетях в дискретном случае с использованием метрики пространства Евклида и пространства Гильберта в непрерывном случае. Полученные результаты позволяют выявить общие закономерности роста точности аппроксимации трафика (степени адекватности моделей) в зависимости от увеличения размерности моделей и объемов выборок.

Ключевые слова: нестационарный трафик; верификация моделей трафика; гетерогенные компьютерные сети; пространство Евклида; пространство Гильберта.

Стаття надійшла до редакції 10.11.2018 р.
Прийнято до друку 05.12.2018 р.