

УДК 681.324

Г.А. КУЧУК, О.О. МОЖАЄВ, О.В. ВОРОБІЙОВ

Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Україна

АНАЛІЗ ТА МОДЕЛІ САМОПОДІБНОГО ТРАФІКА

Проведено аналіз причин виникнення властивості самоподібності у трафіку розподілених телекомунікаційних мереж, показаний його фрактальний характер. Запропоновані фізичні та математичні трафікові моделі.

трафік, самоподібність, розподілена телекомунікаційна мережа, фізична модель, математична модель

Вступ

Розвиток авіації і авіаційної техніки, виникнення нових транспортних авіазасобів, у тому числі і малої авіації, привів до значного зростання обсягу і інтенсивності обміну інформацією, яка передається і використовується для функціонування диспетчерських служб і служб управління польотами різного рівня. Ці процеси привели до ускладнення і укрупнення структури відповідної розподіленої телекомунікаційної мережі (ТКМ) диспетчерської служби (ДС). Очевидно, що така розподілена мережа володіє всіма достоїнствами і недоліками сучасних багаторівневих ТКМ, тобто ефективність її функціонування визначається точністю прогнозу поведінки мережевого трафіка. Отже, для підвищення ефективності функціонування ТКМ ДС необхідно вирішити задачу моделювання і прогнозування поведінки трафіка в мережі.

Сучасна розподілена ТКМ – це об'єкт високої структурної складності, теорія побудови якої перебуває на стадії становлення. Спочатку теорія трафіка базувалася на класичній теорії масового обслуговування і достатньо повно описувала процеси, які відбуваються в системах передачі інформації, що використовують принцип комутації каналів. Але із розвитком ТКМ і появою мереж із пакетною передачею даних, які стали все більше витісняти мережі із комутацією каналів, виявилось, що трафік сучасних мереж має абсолютно іншу структуру, ніж прийнято в класичній теорії. Зокрема було встановлено, що трафік

такої мережі володіє властивістю «самоподібності», тобто виглядає якісно однаково при майже будь-яких масштабах часової осі, має пам'ять, післядію та характеризується високим ступенем пачковості. [1, 2].

Аналіз робіт, що відносяться до аналізу самоподібності трафіку в телекомунікаційних мережах показав, що до теперішнього часу немає повної фізичної моделі самоподібного трафіку і аналізу причин, які його викликають. Складність розуміння принципів, які можуть привести до самоподібності трафіку в мережі, в основному визначається тим, що не існує одного чинника самоподібності. Тому задача фізичного моделювання трафіка і аналізу можливих чинників виникнення самоподібності трафікового процесу є **актуальною**.

Метою даної статті є аналіз причин виникнення самоподібного трафіка, фізичне і математичне моделювання цього процесу і порівняння результатів одержаних математичних моделей із реальним трафіком.

1. Основні причини появи самоподібності у трафіковому процесі

Сучасні дослідження показують, що самоподібність в оточенні, що ідеалізується, тобто із необмеженими ресурсами і незалежними джерелами трафіку, може виникати внаслідок об'єднання безлічі окремих, хоч і сильно мінливих ON/OFF джерел (тобто ON- і OFF- періоди мають розподіли із «важкими хвостами» і нескінченні дисперсії, адекватні, наприклад, класичному розподілу Парето) [1, 3 – 5].

Іншими словами, накладення безлічі ON/OFF джерел, що виявляють синдром нескінченної дисперсії («ефект Ноя»), в результаті дає самоподібний об'єднаний мережевий трафік, який наближається до фрактального броунівського руху («ефект Джозефа»). Крім того, дослідження різних трафікових джерел показують, що високомінлива поведінка ON/OFF джерел є властивістю архітектури клієнт/сервер [2, 4, 6].

Однак, ці результати не є реалістичними в умовах реального мережевого оточення. Не дивлячись на наведені вище міркування, реальні клієнт/серверні мережеві оточення завжди передбачають обмеженість ресурсів. Це означає, що із-за боротьби за обмежені ресурси можуть виникати нелінійні процеси, і, як наслідок, виникає зв'язок між джерелами трафіку. Крім того, різні (засновані на зворотному зв'язку) механізми управління, наприклад алгоритми планувальника OS (Operating System), TCP (Transmission Control Protocol), Ethernet і ін., також можуть давати додаткову нелінійність у разі перевантаження каналів передачі даних.

Різноманітні кореляційні процеси, що є наявними в самоподібному мережевому трафіку, які діють на різних часових масштабах, можуть виникати з різних причин, виявляючи себе в характеристиках відносно конкретного часового масштабу. Це можуть бути, наприклад, структура інформації і пошуку (додатків, диска і програми в пам'яті), «час обдумування» користувача і перевагу передач файлів, ефекти кешування, TCP, Ethernet і різні АТМ-механізми управління. Крім того, труднощі при розумінні взаємодії між різними «окремими» кореляціями, створюваними в мережевому трафіку перерахованими чинниками, ще більш ускладнюють дану проблему.

Перерахуємо деякі з основних чинників, які можуть продукувати в мережевому трафіку фрактальні стохастичні процеси різних видів:

- поведінка користувача;
- генерація структури і пошук даних;
- об'єднання трафіку;

- засоби управління мережею;
- механізми управління, засновані на зворотному зв'язку;
- розвиток мережі.

Проведемо якісний аналіз всіх вищеперелічених причин прояви самоподібного характеру трафіка ТКМ ДС. Поведінка користувача є одним з найважливіших чинників, що впливають на характер трафіку. Встановлено, що розподіл призначених для користувача запитів і пріоритетів для документів у великих розподілених мережах (зокрема, в ТКМ ДС) має надзвичайний ступінь флуктуацій в широкому діапазоні часових масштабів [4].

Генерація, структура і пошук даних, особливо в стислих часових рамках ТКМ ДС, тісно пов'язані з появою трафіка із самоподібною структурою. Різні додатки-джерела можуть забезпечувати трафік на самому верхньому рівні статистично різними характеристиками, але основні характеристики, що визначають статистичну поведінку, такі як, наприклад, кореляційна функція, як правило, інваріантні від одного джерела до іншого.

При використанні механізмів управління мережею можуть виникати нелінійні залежності, оскільки із-за обмеженості ресурсів різні конфліктні ситуації не можуть вирішуватися простими способами. Це призводить до того, що в мережевому трафіку можуть виявлятися властивості фрактальності. Подібні проблеми обговорюються в [2], де показано, що в разі використання механізмів управління потоками типу TCP міра, з якою розміри файлів описуються розподілами із важкими хвостами, може безпосередньо визначати міру самоподібності (показник Херста H) мережевого трафіку.

Подальше ускладнення виникає через велику кількість механізмів управління, які засновані на зворотному зв'язку, наприклад механізми управління потоком і перевантаженням. Це означає, що в разі перевантаження може виявлятися додаткова нелінійність. У подібних ситуаціях можуть виникнути дуже складні взаємозв'язки між флуктуаціями робо-

чого навантаження і різними мережевими механізмами управління. Ці взаємодії дають не лише потужну можливість для управління фрактальною структурою трафіку, але і в деяких випадках можуть навіть створити або підсилити її [7, 8].

Розвиток мережі є також важливою причиною зростання пульсуючої структури мережевого трафіку. При кількісній оцінці характеристики каналного рівня визначають параметри мережевого трафіку в мілісекундних масштабах. Вплив поведінки людини, як генерація даних і пошук, визначають характер трафіку на десятках секунд і вище (хвилини і навіть години). У проміжку, ймовірно, домінуватимуть впливи різних механізмів управління потоками, таких як TCP (на часових масштабах секунд). Характеристики побудови черг можуть домінувати на десятках і сотнях мілісекунд [6, 9 – 12].

Однією з найсерйозніших перешкод, яка не допускає збереження трафіку, що є згенерованим окремими джерелами, в ізольованому стані один від одного, є присутність механізму об'єднання трафіку (статистичного мультиплексування), яке використовується в мережах із комутацією пакетів або чарунок. Відомо, що накладення безлічі ON/OFF-джерел, що виявляють синдром нескінченної дисперсії, призводить до об'єданого самоподібного мережевого трафіку, який наближається до фрактального броунівського руху. Характеристики персистентності в трафіку також виявляються надто стійкими до операцій мережі, таких як поділ, об'єднання, побудова черг, організація управління і формування [12]. Самоподібність зберігається при накладенні однорідних і різномірних, тобто незалежних джерел трафіка. Ця властивість присутня в широкому діапазоні таких умов, як у випадках змін граничної пропускної спроможності і місткості буфера, так і при змішуванні із перехресним трафіком, що має інші кореляційні характеристики [2, 13]. Коли конкретне джерело генерує трафік із довготривалою залежністю (ДТЗ-трафік), то і об'єднаний мережевий трафік стає ДТЗ-трафіком, незалежно від характеристик

інших трафіків в суміші. Процес об'єднання дуже складний, і весь діапазон властивостей при змішуванні повинен змінитися, тобто окрім показника Херста також повинні суттєво змінитися середнє значення і дисперсія [12, 14]. Надалі ми детальніше зупинимося якраз на цій причині виникнення фрактального характеру трафікового процесу ТКМ ДС.

2. Процес об'єднання трафіка

При об'єднанні окремих потоків і повідомлень в єдиний трафіковий потік, наприклад, між віддалено розташованими мережевими сегментами (наприклад, локальними обчислювальними мережами диспетчерського пункту), він розглядається як трафіковий об'єкт глобальної мережі. Для об'єданого трафіку вимоги до якості обслуговування виконуються як за наявності доступу користувача до певної пропускної спроможності між граничними точками маршруту, так і за наявності розподілу користувачем цієї пропускної спроможності між безперервними і еластичними потоками. Але на практиці постійна і однакова швидкості передачі погано узгоджуються із вимогами користувача, оскільки об'єднаний трафік володіє властивістю високої піковості із елементами самоподібності.

Для побудови фізичної моделі процесу об'єднання трафіку детально розглянемо процес пакетизації інформації і статистичне мультиплексування.

Для створення чарунок (наприклад, в АТМ!) необхідний пристрій, який перетворює потік інформаційних бітів в чарунки, тобто генератор чарунок або пакетизатор. Генератор чарунок є пристроєм, в якому здійснюється як формування чарунки, так і пов'язана з цим процесом затримка інформації. Оскільки порції інформації надходять в генератор чарунок нерівномірно, то для забезпечення нормальної роботи генератора останній повинен містити буферний накопичувач. Порції інформації, що надходять до буферного накопичувача, утворюють чергу із обмеженим числом місць очікування (рис. 1) [15].

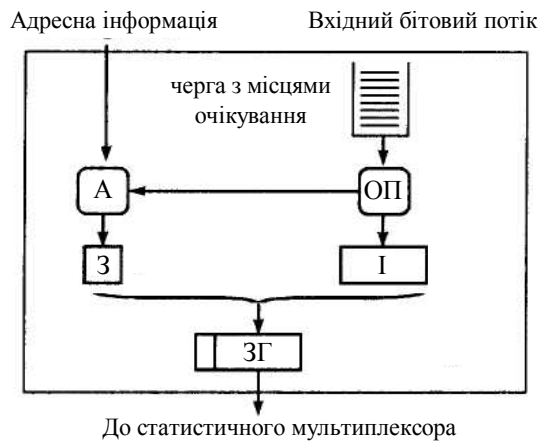


Рис. 1. Принцип генерації чарунк у ТКМ ДС (АТМ):

А – адресний накопичувач; З – заголовок;
І – передавана інформація; ОП – обслуговуючий пристрій; ЗГ – згенерована чарунка

Різномірність джерел навантаження призводить до необхідності оцінки якості обслуговування користувачів і обсягу обладнання на вузлах комутації ТКМ ДС. Якість обслуговування в ТКМ ДС в значній мірі залежить від алгоритму роботи пристрою статистичного мультиплексування (ПСМ).

Статистичне мультиплексування в ТКМ будується на основі асинхронно-часового мультиплексу-

вання. ПСМ є керованим буферним накопичувачем, на який надходять чарунки від генераторів чарунок. Із накопичувача чарунки надходять до каналу ТКМ. Спрощена схема взаємодії ПСМ із генератором чарунок показана на рис. 2.

При створенні ПСМ доводиться вирішувати три важливі проблеми:

- класифікацію користувача (User Classification);
- розподіл ресурсу (Resource Allocation);
- управління трафіком (Traffic Policing).

ПСМ є структурно-складною системою масового обслуговування. Питанням математичних моделей його функціонування за останні два десятиліття присвячено багато досліджень. Обмежимося лише загальними зауваженнями про математичні моделі ПСМ.

Перш за все зупинимося на моделях джерел навантаження, які створюють навантаження на ПСМ. Найбільш використовуваною в даний час загальною моделлю є марківська модель MAP (Markovian Arrival Process), яку можна уявити як марківський ланцюг із безперервним часом і кінцевим числом станів. Ця модель в окремих випадках розбивається на підкласи моделей (MMPP – Markov Modulated

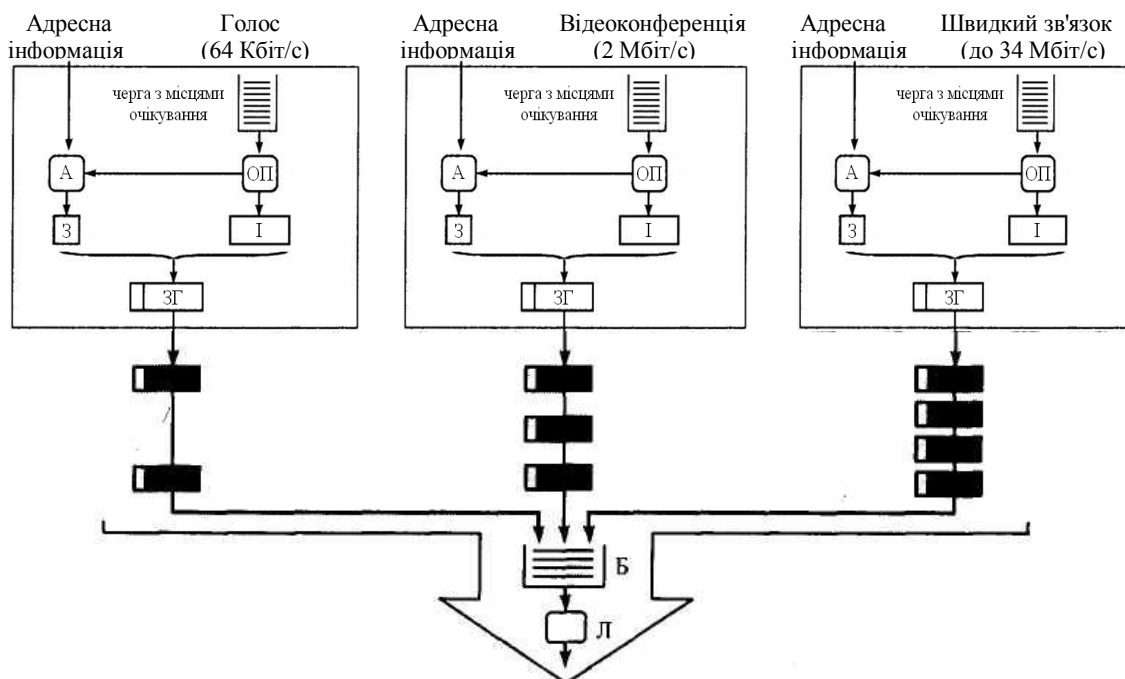


Рис. 2. Приклад схеми пристрою статистичного мультиплексування (Б – буфер, в якому очікують чарунки, Л – лінія ТКМ ДС)

Poisson Process; PH – Phase type distribution; COX – COXian distribution; IPP – Interrupted Poisson Process; ERL – ERLang distribution; HEXP – Hyper Exponential distribution; M – Poisson Process). Зв'язок MAP із підкласами моделей представлений на рис. 3 [16].

При припущенні про експоненціальний розподіл тривалості беретів, що надходять на мультиплексор, середня тривалість берета, біт,

$$B_L = Tr_m / b_{cell} ; \quad (1)$$

де T – середня тривалість передачі беретів, біт; b_{cell} – довжина чарунки, біт; r_m – максимальна бітова швидкість джерела інформації.

Відомо багато досліджень, в яких детально розглянуті різні моделі мультиплексорів як однолінійних систем із кінцевим і нескінченним числом місць очікування в чергах при різних припущеннях про потоки чарунок, що надходять. Оскільки чарунки мають фіксовану довжину, то ці моделі вивчені при детермінованому часі обслуговування.

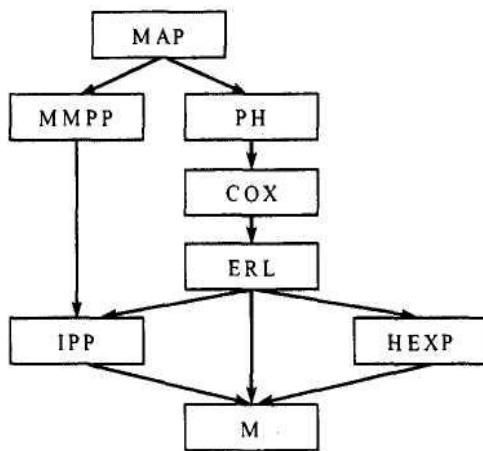


Рис. 3. Ієрархія моделей опису PCM

Аналіз однолінійної системи із нескінченною чергою, детермінованим обслуговуванням і N детермінованими потоками $(ND/D/I)$ наведений у [2].

Використовуючи результати [2], запишемо ймовірність того, що черга перевищить x чарунок:

$$P(x) = \sum_{n=x+1}^N \left\{ \frac{N!}{n!(N-n)!} \left(\frac{n-x}{D} \right)^n \times \left[1 - \left(\frac{n-x}{D} \right) \right]^{N-n} \frac{D-N+x}{D-n+x} \right\}, \quad (2)$$

де x – ємкість буфера; N – число джерел; D – час обслуговування часового каналу, $D = N/\rho$; ρ – надходzące навантаження, Ерл. Результати розрахунку ймовірності втрат чарунок при різних навантаженнях за виразом (2) надані на рис. 4.

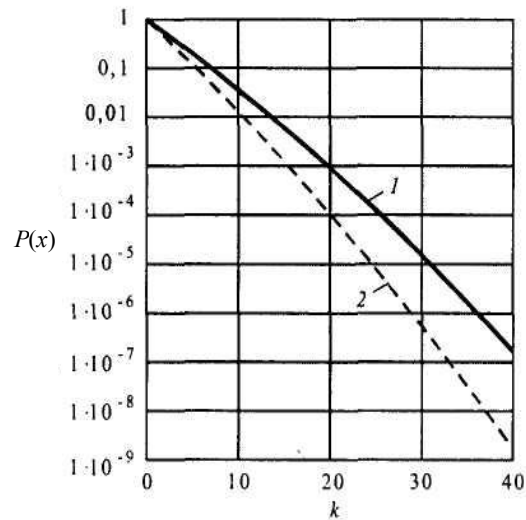


Рис. 4. Оцінка ймовірності втрат чарунок при навантаженні 0,85 Ерл (1) та 0,75 Ерл (2)

Так, наприклад, в моделі мультиплексора, представлений на рис. 5, припускається, що надходять різномірні потоки чарунок.

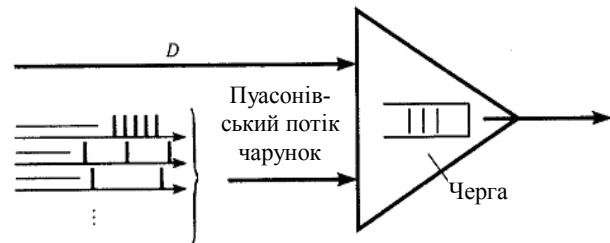


Рис 5. Модель мультиплексора $M + D/D/1$ з очікуванням

Детальніше із математичними моделями мультиплексорів можна ознайомитися в [15].

3. Математичне моделювання процесу мультиплексування

Авторами було проведено математичне моделювання процесу злиття трафіка із різними інтенсивностями в PCM. Модель джерела є модифікованою ON/OFF-моделлю, що відрізняється від традиційних моделей, тим, що для ON- і OFF-періодів можлива

нескінченно велика дисперсія. Накладення великого числа таких джерел, взагалі кажучи, дає об'єднаний трафік, що виявляє довготривалу залежність.

Модель джерела може бути описана таким чином. Нехай $\lambda_t^{(i)}$ - інтенсивність генерації чарунок для джерела i у момент часу t , джерело i передаватиме чарунки із такою інтенсивністю, якщо воно перебуває в ON-періоді і не передаватиме, якщо в OFF-періоді; інтервали часу, проведені в ON-періодах, є незалежними і однаково розподіленими випадковими величинами із розподілом типу Парето та кінцевим математичним сподіванням і нескінченною дисперсією і функцією розподілу вигляду $P\{\tau > t\} \sim t^{-\beta}$, $t \rightarrow \infty$, $1 < \beta < 2$; OFF-періоди – це незалежні і однаково розподілені випадкові величини із загальним розподілом Θ^i та кінцевим математичним сподіванням m_Θ . Покладемо, що загальна інтенсивність надходження чарунок, що генеруються N незалежними ON/OFF-джерелами, дорівнює

$$\Lambda_i = \sum_{i=1}^N \lambda_t^{(i)} \quad (3)$$

із середнім значенням

$$M[\Lambda_i] = N\mu \frac{m_\tau}{m_\tau + m_\Theta} = N\lambda, \quad (4)$$

де μ – інтенсивність i -го джерела; m_τ – кінцеве середнє значення розподілу Парето.

Проведемо аналіз результатів чисельного моделювання процесу злиття таких пульсуючих джерел трафіка із різними інтенсивностями генерації. В процесі моделювання на першому кроці інтенсивності генерації джерел вибиралися рівними значенням ефективної пропускної спроможності каналу окремого пульсуючого джерела (від 32 до 128 кБ/с). Як приклад, на рис. 6, а, б наведені графіки залежності ідеально пульсуючих джерел трафіку від часу для ефективної пропускної спроможності каналу окремого джерела 64 та 128 кБ/с, відповідно. Надалі на базі цих трафіків було проведено генерацію трафіків окремих джерел, які відрізняються один від одного лише тільки своєю стохастичною фазою. Сmodelьо-

вані трафіки пульсуючих джерел були об'єднані у єдиний широкосмужний трафік (із кількістю окремих джерел від 9 до 60).

На рис. 6, в-д наведений широкосмужний трафік, сформований 45 незалежними пульсуючими джерелами, де надані варіанти дискретної часової залежності одержаного в результаті моделювання сумарного трафіку. Перші 500 точок, взятих з цього трафіка, надані на рис. 6, в. При використанні коефіцієнта розширення 10 процес із 5000 точок формується групівкою отриманих даних блоками по 10 точок та з масштабуванням з коефіцієнтом 0,12 (рис. 6, г). Для 50000 точок аналогічно отримана залежність із групівкою по 100 точок та з масштабуванням з коефіцієнтом 0,015 (рис. 6, д). Як бачимо, широкосмужний трафік має властивість часової інваріантності, високу пиковість і, як наслідок, має фрактальний (самоподібний) характер. Для доведення властивості самоподібності необхідно обчислити статистичні моменти першого і другого порядку та провести оцінку значення показника Херста.

На рис. 7 представлена залежність показника Херста від числа незалежних пульсуючих джерел трафіка. Видно, що показник Херста сумарного процесу збільшується в межах від 0,51 до 0,95 в інтервалі зростання числа пульсуючих джерел трафіка від 20 до 55. Порівняння з аналогічними експериментальними та теоретичними дослідженнями [1, 4, 11], яке було проведено авторами статті, показує, що наведені вище залежності досить точно узгоджуються із аналогічними оцінками.

Подальший аналіз показав, що об'єднаний процес є ДТЗ-процесом і асимптотично самоподібним із показником Херста $H = (3 - \beta)/2 - 0,5$, а нормована кореляційна функція об'єднаного процесу має фрактальний характер. Результати математичного моделювання процесу генерації самоподібного трафіка внаслідок злиття кінцевого числа пульсуючих трафіків досить добре узгоджуються із відомими на даний момент теоретичними роботами, а також із результатами експериментальних досліджень реального трафіку ТКМ ДС [10, 17 – 19].

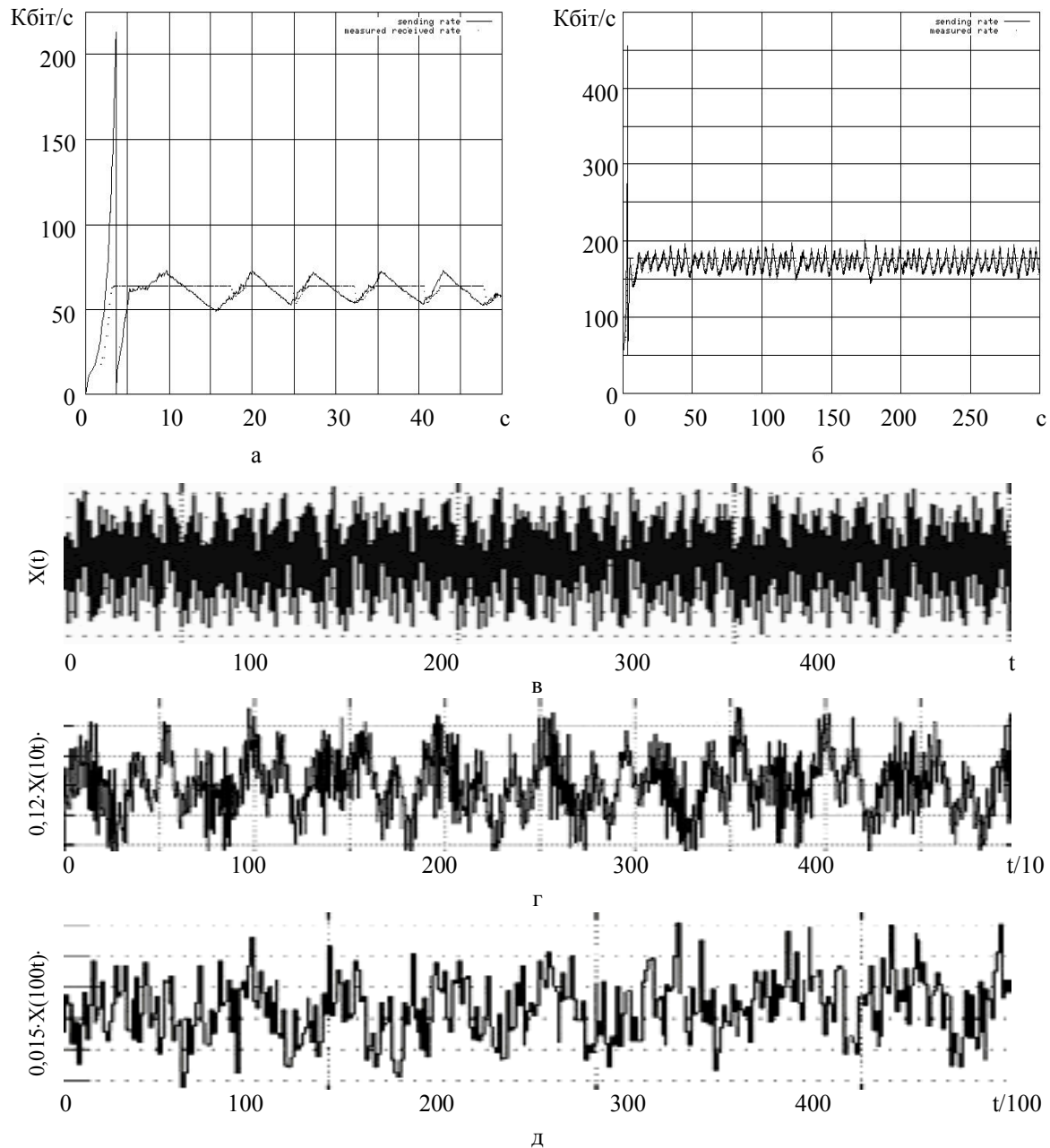


Рис. 6. Результати моделювання

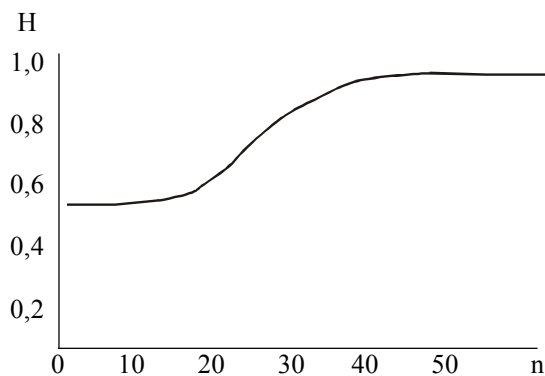


Рис. 7. Залежність показника Херста (H) від кількості незалежних пульсуючих джерел трафіка (n)

Висновки

Запропонована фізична модель об'єднання трафіку, яка ґрунтується на пакетизації інформації і статистичному мультиплексуванні. В результаті математичного моделювання процесу злиття незалежних пульсуючих інформаційних потоків встановлено, що результуючий трафік має фрактальні (самоподібні) властивості.

Проведена оцінка кореляційної функції і показника Херста об'єднаного трафіку також підтвердили гіпотезу про фрактальну природу трафіку.

Результати фізичного і математичного моделювання достатньо повно узгоджуються із результатами аналогічних числових і експериментальних досліджень.

Література

1. Leland W., Taqqu M., Willinger W. On the self-similar nature of IP-traffic // *IEEE/ACM Transaction on Networking*. – 1997. – № 3. – P. 423-431.
2. Фрактальный анализ процессов, структур и сигналов: Коллективная монография / Р.Э. Пашенко, Г.А. Кучук, А.А. Можаяев и др.; под ред. Р.Э. Пашенко. – Х.: ЭкоПерспектива, 2006. – 360 с.
3. Кучук Г.А. Метод дослідження фрактального мережного трафіка // *Системи обробки інформації*. – Х.: ХВУ, 2005. – Вип. 5(45). – С. 74-84.
4. Crovella M.E., Bestavros A. Self-Similarity in world wide web traffic: evidence and possible causes // *Proceedings of the 1996 ACM SIGMET-RICS. International Conference on Measurement and Modeling of Computer Systems*, May1996. – P. 156-161.
5. Кучук Г.А. Моделирование трафика изолированного пульсирующего источника // *Системи обробки інформації*. – Х.: ХВУ, 2004. – Вип. 3. – С. 91-99.
6. Кучук Г.А. Моделирование обобщенного фрактального броуновского движения // *Зб. наук. праць ІПМЕ*. – К.: НАНУ, ІПМЕ, 2003. – Вип. 22. – С. 79-82.
7. Erramilli A., Narayan O., Willinger W. Experimental queuing analysis with long-range dependent packet traffic // *IEEE/ACM Transaction on Networking*. – 1996. – № 4. – P. 209-223.
8. Кучук Г.А. Учет фрактальных свойств пульсирующего трафика // *1 Межд. НТК "Инфотелекоммуникационные технологии в науке, производстве и образовании"*, 19.12.2004. – Ставрополь: МОН РФ, СевКГТУ, 2004. – С.286-291.
9. Кочура В.О., Кучук Г.А., Можаяев О.О. Моделирование динамических процессов в виртуальных соединениях // *Збірник наукових праць Об'єднаного науково-дослідного інституту Збройних Сил*. – Х.: ОНДІ ЗС, 2006. – Вип. 2 (4). – С.217-224.
10. Можаяев А.А., Семенов С.Г., Кривчач С.Ф. Вычисление параметра маршрутизации для распределения трафика по найденному множеству путей // *Системи обробки інформації*. – Х.: ХУ ПС, 2005. – Вип. 9 (49). – С.107-111.
11. Willinger W., Taqqu M.S., Erramilli A. A Bibliographical Guide to Self-Similar Traffic and Performance for Modern High-Speed Networks // *Stochastic Networks: Theory and Applications*. – Oxford University Press. – 1996. – P. 282-296.
12. Кучук Г.А., Можаяев О.О., Воробйов О.В. Метод прогнозування фрактального трафіка // *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*. – 2006. – № 6 (18). – С. 181-188.
13. Кучук Г.А. Метод оценки характеристик АТМ-трафика // *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. – 2003. – № 6 (44). – С. 25-29.
14. Королев А.В., Кучук Г.А., Пашнев А.А. Управление сетевыми ресурсами. – Х.: ХВУ, 2004. – 224 с.
15. Muller-Clostermann B., Uhl T., Zaske S. Modeling and Analysis of Arrival Processes // *Third German-Soviet Seminar on Flow Control and Integrated Communication System*. University of Dortmund. Institute for Electronic Systems and Switching. Dortmund, 15.9.1991. – P.342-356.
16. Likhanov N., Tsybacov B., Georganas N.D. Analysis of an ATM buffer with self-similar ("fractal") input traffic // *Proceedings of the IEEE Infocom '95*, Boston, MA, 1995. – P. 985-992.
17. Стеклов В.К., Беркман Л.Н. Телекоммуникаційні мережі. – К.: Техніка, 2001. – 392 с.
18. Столлинс В. Современные компьютерные сети. – С.-Пб.: Питер, 2003. – 784 с.
19. Кучук Г.А. Фрактальный гауссовский шум в трафиковых трассах // *Системи обробки інформації*. – Х.: ХВУ, 2004. – Вип. 3. – С. 91 – 99

Надійшла до редакції 31.05.2006

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.А. Краснобаев, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

