УДК 519.876.5

Д.О. Жуковська, В.Я. Воропаєва (канд. техн. наук, доц.)

Донецький національний технічний університет, м. Покровськ

кафедра автоматики та телекомунікацій

E-mail: daria.zhukovska@donntu.edu.ua, viktoriya.voropayeva@donntu.edu.ua

**МЕТОД ПРІОРИТЕТНОГО УПРАВЛІННЯ РАДІОРЕСУРСОМ
СУПУТНИКОВОГО КАНАЛУ НА ОСНОВІ ПРОГНОЗУВАННЯ
ВХІДНОГО ТРАФІКУ**

Запропоновано метод прогнозування телекомунікаційного трафіку за допомогою нейронних мереж з використанням нелінійної авторегресійної моделі, що дозволяє отримати прогнозне значення періодів істотних змін часткового співвідношення трафіків різних типів для подальшого використання при динамічному розподілі пропускної здатності супутникового каналу зв'язку. На основі отриманого прогнозу реалізована модель пріоритетного управління трафіком в супутниковому каналі зв'язку, що дозволяє визначити пропускну здатність каналу і оцінити ефект, який досягається за рахунок використання пріоритетного управління. Проведено аналіз і визначені види розподілів трафіку, за допомогою яких сформована навчальна вибірка даних. Проведено оцінку ефективності від введення пріоритетного управління трафіком, що дозволяє розробити керуючий вплив на параметри системи з метою підвищення ефективності розподілу радіоресурсу супутникових каналів зв'язку.

Ключові слова: супутниковий канал зв'язку, ефективність, управління, прогнозування, нейронна мережа, моделювання, авторегресія, пропускну здатність, пріоритет, трафік.

DOI: 10.31474/2075-4272-2018-1-31-79-93

Загальна постановка проблеми. В даний час спостерігається підвищений попит на надання послуг мультимедійного контенту, телефонного та відеозв'язку, передачі даних, який в ряді випадків може бути задоволений тільки за рахунок використання мереж супутникового зв'язку. При цьому навантаження на мережу зв'язку (трафік), як правило, має складну структуру.

Широта зон обслуговування мереж супутникового зв'язку з одного боку, і принципова обмеженість орбітального радіоресурсу, з іншого боку, вимагають оперативного управління радіоресурсом з метою підвищення ефективності його використання.

На сьогоднішній день доступність супутникового каналу прийнято оцінювати в 99%. Це означає, що в цілому канал може не функціонувати не більше 3,66 доби на рік.

В залежності від виду супутника, що використовується, затримка варіюється від 250 мс до 400 мс для середньовисотних супутників та до 600 мс для геостационарних. Загальні втрати при передачі даних становлять – 4,43% [1]. Зазначені показники якості є незадовільними для сучасних телекомунікаційних мереж та вимог, що пред'являються користувачами. Забезпечення необхідної якості функціонування супутникових мереж зв'язку може бути досягнуто за рахунок використання динамічного перерозподілу радіоресурсу супутникового каналу.

Результати багатьох досліджень [2] доводять, що трафік сучасних телекомунікаційних мереж має фрактальні властивості і, зокрема, властивість самоподібності.

Самоподібні процеси мають довгострокову залежність, що виражається в нескінченному інтервалі кореляції. Врахування таких довгострокових залежностей не

дозволяє скористатися класичним математичним апаратом теорії телетрафіка. Тобто наявність в трафіку самоподібності дозволяє передбачити його поведінку на тривалих часових інтервалах та отримати прогностичні значення можливого пікового навантаження і час його появи. Використовуючи такі прогнози, можна створювати ефективні алгоритми управління трафіком для прийняття відповідних заходів щодо забезпечення якості обслуговування.

Таким чином, розробка ефективних методів прогнозування та подальшого управління трафіком в супутникових системах зв'язку є складною науковою задачею і одним з важливих наукових напрямів досліджень.

Постановка задач дослідження. Мета роботи полягає в дослідженні статистичних характеристик потоків супутникових систем зв'язку за допомогою моделювання з використання законів розподілу тривалості повідомлень і часу їх надходження на передачу, що дозволяють враховувати властивості, характерні потокам в мультисервісних мережах. Прогнозування надходження трафіку в супутниковій системі зв'язку для динамічного розподілу пропускної здатності каналу в будь-який момент часу. Розробці математичної моделі розрахунку середньої затримки пакетів певного типу з урахуванням самоподібних процесів для отримання значення максимальної і мінімальної пропускної здатності для різних видів трафіку, а також пропускної здатності супутникового каналу. Оцінка ефективності від введення пріоритетного управління трафіком

Досягнення мети забезпечується розв'язанням таких завдань:

- проведенні огляду і визначенні видів розподілів трафіку;
- розробці методу і алгоритму прогнозу на підставі нейронної мережі;
- побудові нейронної мережі та перевірці її адекватності;
- визначенні максимального і мінімального значення пропускної здатності для різних видів трафіку;
- визначенні пропускної здатності супутникового каналу і оцінці ефективності від введення пріоритетного управління трафіком.

Результати розробок і досліджень. Супутникові та наземні системи зв'язку мають свої особливості і, відповідно, до них пред'являються різні вимоги і обмеження. Тому, не всі технології, призначені для наземних телекомунікаційних систем, можуть бути застосовані для супутникових систем зв'язку. Наявність жорстких вимог при стандартизації систем космічної галузі також обмежує перелік можливих технологій. До того ж, ресурси бортового обладнання супутника (пам'ять, ступінь інтеграції і споживана потужність та ін.) дуже обмежені. Однак слід зазначити, що такі параметри обладнання, розміщеного на супутнику, як кількість обчислювальних і енергетичних ресурсів значно вище, ніж у наземного мобільного терміналу.

Таким чином, доступність великої кількості ресурсів потенційно дозволяє супутниковій системі використовувати значно ширший спектр технологій [3].

Забезпечення ефективного функціонування сучасних мереж зв'язку при обслуговуванні багатопріоритетних і мультисервісних потоків заявок користувачів, вимагає розробки нових, більш ефективних алгоритмів динамічної оптимізації ресурсів мережі, а, отже, адаптації технології до специфічних умов функціонування мереж супутникового зв'язку, а також поточного управління якістю обслуговування абонентів в умовах мінливого та багатопріоритетного навантаження [4-5].

Для вирішення задач розподілу радіоресурсу каналу мережі супутникового зв'язку закладена ідея, що базується на прогнозуванні обсягу вхідного трафіку [6]. Саме цей підхід обрано для вирішення поставленої задачі.

В результаті досліджень в області побудови прогнозних моделей трафіку [7-8] були виявлені такі властивості трафіку, як угруповання в часі значних змін значень («стрибків»), фрактальність, хаотичність, нелінійність, циклічні коливання.

В роботі [9] викладено основні положення та методи класичної та сучасної теорії телетрафіка, на яких базуються процедури проектування телекомунікаційних систем та мереж.

В якості моделей функціонування мультисервісних мереж застосовуються мережі масового обслуговування різних класів [10], що представляють собою сукупність взаємопов'язаних систем масового обслуговування (СМО), що розглядаються як базові моделі [11]. Неоднорідністю навантаження обумовлюється необхідність використання в якості базових моделей СМО з неоднорідним потоком заявок, обслуговування яких реалізується на основі пріоритетних стратегій [12].

При вирішенні задач управління, класифікації, прогнозування в телекомунікаційних мережах часто використовують нейронні мережі. Такий підхід визначається рядом причин: нейромережі – це найпотужніший метод імітації явищ і процесів, який дозволяє показувати складні залежності навіть при великій кількості змінних; використовують механізм навчання – користувач нейронної системи підбирає представницькі дані і запускає навчальний алгоритм, який сам налаштовує параметри мережі без участі користувача. В роботі [13] викладені основні аспекти теорії штучних нейронних мереж, а у [14] наведено порівняльний аналіз методів прогнозування трафіку в телекомунікаційних системах.

В роботі [15] для прогнозування розглянуто модель нелінійної авторегресії з зовнішніми входами (NARX). Вона являє собою рекурентну динамічну мережу зі зворотним зв'язком, що складається з декількох шарів, в її основі лежить авторегресійна модель. В результаті, прогноз нейронних мереж виявляється набагато точніше прогнозів, отриманих іншими способами (евристичний метод, метод Independent Electricity System Operator, множинна лінійна регресія). Це пояснюється тим, що NARX показує найкращі результати при моделюванні нестационарних сигналів. Отже, для прогнозування у супутниковій мережі вирішено обрати саме цю модель, яка дозволить отримати прогнозне значення періодів істотних змін часткового співвідношення трафіків різних типів для подальшого використання при динамічному розподілі пропускну здатності супутникового каналу.

Для дослідження особливостей планування ресурсів та передачі трафіку по супутниковому каналі в роботі використовується структурна схема, що представлена на рисунку 1. Мережа складається з центральної станції (ЦС), яка встановлюється на головному вузлі провайдера, а також мережі абонентських станцій (АС), які встановлюються безпосередньо в точках надання послуг. Взаємодія ЦС з мережею АС здійснюється через геостационарний супутник зв'язку. ЦС взаємодіє з усіма АС мережі і маршрутизує відповідний трафік за напрямками. До ЦС можуть бути підключені різні цифрові мережі, при цьому забезпечується відповідна пріоритезація і QoS переданої інформації.

Взаємодія терміналів між собою здійснюється через єдиний супутниковий ресурс мережі з множинним доступом на вимогу, розділеним в часі і по частоті. Система управління управляє черговістю включення терміналів. Таким чином, управління розподілом ресурсу в мережі, пріоритетами і QoS здійснює ЦС. Отже, саме на ділянці ЦС-супутник і буде вирішуватись задача ефективного розподілу ресурсу, а саме, пропускну здатності.

Сучасні наукові дослідження передачі трафіку різного типу та надання послуг, доводять, що процеси, що відбуваються в мережі, мають нестійку структуру за рахунок самоподібних властивостей, що спричиняють затримки, які не відповідають вимогам якості обслуговування. З метою дослідження статистичних характеристик мультимедійних потоків супутникових систем зв'язку (ССЗ), в тому числі ступеня їх самоподібності, в роботі проведено моделювання трьох типів трафіку: трафік Internet (передача даних), трафік, що формується переглядом відео-файлу в режимі реального часу та голосовий трафік [16]. Правильно обраний закон розподілу дозволяє отримати адекватну модель для оцінки якості обслуговування.

Рисунок 1 – Структурна схема супутникової системи зв'язку

Проаналізувавши наукові дослідження в даній області [17] було обрано наступні закони розподілу для різних типів трафіку:

1) для Internet-трафіку використовується закон Парето, для якого представлені функція щільності імовірності (1) та кумулятивна функція розподілу (2):

$$f(x) = \frac{\alpha \beta^\alpha}{x^{\alpha+1}}, \quad (1)$$

$$F(x) = 1 - \left(\frac{\beta}{x}\right)^\alpha \quad (2)$$

де α – параметр безперервної форми ($\alpha > 0$); β – параметр безперервного масштабування ($\beta > 0$).

2) для голосового трафіку використовується логнормальний закон, для якого представлені функція щільності імовірності (3) та кумулятивна функція розподілу (4):

$$f(x) = \frac{\exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(x-\gamma)-\mu}{\sigma}\right)^2\right)}{(x-\gamma)\sigma\sqrt{2\pi}}, \quad (3)$$

$$F(x) = \Phi\left(\frac{\ln(x-\gamma)-\mu}{\sigma}\right); \quad (4)$$

де γ – параметр безперервного розташування; μ – безперервний параметр, математичне очікування; σ – безперервний параметр ($\sigma > 0$), середньоквадратичне відхилення; Φ – інтеграл Лапласа.

3) для трафіку, що формується переглядом відео в режимі реального часу використовується закон Вейбула, для якого представлені функція щільності імовірності (5) та кумулятивна функція розподілу (6):

$$f(x) = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{x - \gamma}{\beta} \right)^{\alpha-1} \exp \left(- \left(\frac{x - \gamma}{\beta} \right)^{\alpha} \right), \quad (5)$$

$$F(x) = 1 - \exp \left(- \left(\frac{x - \gamma}{\beta} \right)^{\alpha} \right). \quad (6)$$

де α – параметр безперервної форми ($\alpha > 0$); β – параметр безперервного масштабування ($\beta > 0$); γ – параметр безперервного розташування.

Для того, щоб підвищити показники якості обслуговування та ефективно розподілити пропускну здатність супутникового каналу була поставлена задача прогнозування надходження трафіку в ССЗ, щоб обладнання ЦС динамічно перерозподіляло пропускну здатність каналу в будь-який момент часу.

Обрані закони розподілу використовуються для моделювання навчальної вибірки, що подається на вхід нейронної мережі.

Для прогнозування трафіку використовувалася мережа, що представляє собою модель нелінійної авторегресії з зовнішніми входами (NARX). При такій архітектурі мережі необхідно ставити як вхідні значення функції, так і цільові. Дані на вході, проходячи через мережу, обробляються відповідно до вагових коефіцієнтів, а потім знову потрапляють на вхід мережі, тим самим замінюючи собою зворотне поширення помилки. Це дає можливість застосування отриманих після первинного навчання вагових коефіцієнтів при повторному навчанні мережі, що в свою чергу підвищує точність її роботи. Також при такій архітектурі помилка в тестовій вибірці нижче, ніж в навчальній, що говорить про правильне навчання мережі. Дана модель вирішує задачу прогнозування часового ряду. Прогнозоване значення залежить від n попередніх значень виходу і від n попередніх значень часового ряду. На рис.2 представлена схема нейронної мережі, що використовується в даній роботі.

Метою даної роботи є використання нейронної мережі для прогнозування трафіку за допомогою часового ряду. Для досягнення мети написана програма, що моделює нелінійну авторегресійну модель нейронної мережі з зовнішніми входами, яка навчається за допомогою алгоритмів Левенберга-Марквардта, Байєсової регуляризації і методу масштабованих сполучених градієнтів. Результат роботи програми надає прогнозовані значення трафіку в залежності від моменту часу.

Рисунок 2 – NARX з n нейронами прихованого шару

Після аналізу спеціалізованих інструментальних засобів створення штучних нейронних мереж нейронна мережа була реалізована в середовищі MATLAB з використанням вбудованого програмного пакету Neural Network Toolbox. Схема алгоритму програми приведена на рисунку 3.

Рисунок 3 – Схема алгоритму програми

Для вирішення задачі розподілу пропускної здатності на ділянці ЦС-супутник пропонується застосовування спеціальних методів управління трафіком, що дозволяють ефективно розподілити пропускну здатність каналу зв'язку між пакетами різних типів, враховуючи прогнозні значення надходження заявок з різними пріоритетами.

Для реалізації такого управління слід визначитись з вимогами до пропускних здатностей супутникового каналу зв'язку. Очевидно, що ці вимоги істотно залежать від навантаження, створюваного переданими пакетами даних, самоподібних властивостей і обмежень на час доставки пакетів різних типів, при цьому обмеження можуть бути двох видів:

1) імовірнісні, у вигляді допустимої імовірності γ_i^* перевищення заданого обмеження τ_i^* на час затримки τ_i пакетів в мережі: $P(\tau_i > \tau_i^*) < \gamma_i^*, (i = \overline{1, n})$;

2) середнє у вигляді обмеження τ_i^* на середній час τ_i затримки: $\tau_i > \tau_i^*, (i = \overline{1, n})$ [18].

Середня затримка пакетів i -го типу при використанні методу управління трафіком на основі пріоритетів визначається за формулою (7):

$$\tau_i(X(t)) = \frac{1}{\Lambda} \sum_{j=1}^n \left[\frac{\lambda_j}{V_j} \left(1 + \frac{(\lambda_j)^{(2H_j-1)/(2-2H_j)} \cdot V_j^{1/(2-2H_j)}}{(V_j - \lambda_j)^{H_j/(1-H_j)}} \right) \right] + \tau_{ск}, X(t) = \{X^m(t)\}, \quad (7)$$

де $\tau_{ск}$ – природна затримка в лінії зв'язку для супутникових мереж, що приблизно становить 250 мс; V_i – пропускна здатність каналу зв'язку, кбіт/с; λ – інтенсивність потоку пакетів певного типу, що надходять в канал зв'язку, с⁻¹; $\{X^m(t)\}$ – інформаційний потік певного пріоритету в заданий момент часу; $H_i = \max[H_i], (i = \overline{1, n})$ – параметр Херста: для голосового трафіку $H=0,513$; для трафіку що формується переглядом відео файлу в режимі реального часу $H=0,608$; для Internet-трафіку $H=0,981$;

$$\Lambda = \sum_{j=1}^n \frac{\lambda_j}{L_i},$$

де L_i – середня довжина пакету i -го типу, байт.

Тоді, вирішуючи нерівність $\tau_i > \tau_i^*$, з урахуванням (7), можемо отримати необхідне значення пропускної здатності каналу зв'язку V_i . Так як аналітично виразити значення пропускної здатності досить складно, то в роботі використано пакет математичного моделювання.

В процесі проектування мережі зазвичай задають частку різних типів трафіку в загальному навантаженні. У той же час ця частка протягом доби може змінюватися в значних межах. Але за допомогою проведеного прогнозування телекомунікаційного трафіку, були визначені періоди істотної зміни часткового співвідношення трафіків різних типів. Наступним кроком є оцінка необхідної пропускної здатності для всього діапазону зміни часткового навантаження. Для цього розглянуто граничні випадки, коли частка різних типів трафіку в загальному навантаженні $\rightarrow 0$ та $\rightarrow 1$. Це дає змогу отримати нижню (V_{min}) і верхню (V_{max}) межу пропускної здатності супутникового каналу зв'язку.

Тоді ефект від введення пріоритетного управління складе (8):

$$\Delta = (V_{max} - V_k) / V_k, \quad (8)$$

де V_{max} – верхня межа пропускної здатності для передачі пакетів i -го типу, кбіт/с; k – частка пакетів певного типу в загальному навантаженні.

Для аналізу класу розподілів процесів надходження інтервалів часу між пакетами і тривалості пакетів були використані наступні закони розподілу для різних типів трафіку, які представлені у таблиці 1.

При створенні нейромережі в пакеті MatLab підключається навчальна вибірка даних, створюється нейронна мережа згідно із розробленою структурною схемою. Для ефективного навчання мережі необхідно розділити всі дані на три підмножини. Перша знадобиться для навчання мережі (коригування ваг). Традиційно до цієї підмножини відноситься більшість тестової вибірки. У даній роботі ми використовуємо 80% даних. Друга підмножина необхідна для контролю навчання мережі, яке здійснюється шляхом обчислення помилки на даних з цієї підмножини. На початковому етапі навчання нейронної мережі помилка повинна зменшуватися. Але рано чи пізно мережа може перенавчитися, про що буде свідчити збільшення помилки. Саме для того, щоб уникнути перенавчання мережі, і необхідно вводити другу підмножину даних. Тому навчена мережа матиме ваги, при яких помилка на перевірочній підмножині була мінімальна. І третя підмножина – тестова. Вона не використовується в процесі навчання нейронної мережі, але може бути корисною при порівнянні різних моделей як повністю незалежне тестування навченої мережі. Також тестова підмножина може свідчити про некоректний поділ вихідних даних, якщо мінімум помилки на даній та перевірочній множині досягаються в істотно віддалених одна від одної ітераціях. В роботі для другої і третьої підмножини було виділено по 10% даних.

Таблиця 1 – Закони розподілу часу між надходженням заявок і довжини пакетів для різних типів трафіку та відповідні параметри

Тип трафіку	Закон розподілу	Параметри
HTTP	Парето	$\alpha=0,316, \beta=3,026*10^{-4}$ Пріоритет 3
VoIP	Логнормальний	$\sigma=2,489, \mu=-10,652, \gamma=3,408*10^{-5}$ Пріоритет 2
IP-TV	Вейбула	$\alpha=0,787, \beta=6,432*10^{-5}$ Пріоритет 1

У мережі присутні два входи: один – зовнішній, а другий – з'єднаний з виходом мережі, звідки і отримує вхідні значення. Для кожного з входів є лінія затримки з відводами для зберігання попередніх значень.

Кількість нейронів на прихованому рівні встановлюється експериментально, а число затримок дорівнюватиме 2. Перш ніж почати навчання мережі, що містить лінії затримки з відводами, необхідно заповнити їх початковими значеннями входу і виходу.

Отже, після того, як побудували, навчили і протестували нейронну мережу, можна отримати прогноз. Навчання і тестування мережі відбувається з розімкненим кільцем. Необхідно назад замкнути кільце зворотного зв'язку, тобто з'єднати другий вхід мережі з її виходом, щоб мережа стала здатна до багатокрокових прогнозів. Коли кільце було розімкнуте, то мережа могла передбачити лише одне майбутнє значення. Після замикання кільця кільце, на вхід знову подаються пораховані значення $y(t)$, які були невідомі раніше, і ці дані допомагають отримувати знову і знову нові прогнозні значення.

В якості часового ряду взяті змодельовані дані значення трафіку: вхідні дані – момент надходження заявки певного пріоритету, а вихідні – часткове співвідношення трафіків різних типів в загальному навантаженні.

Нормування змодельованих даних проводиться за формулою:

$$\tilde{x} = \frac{x}{M + c}, \quad (9)$$

де x – елемент вихідного ряду; M – значення максимального елемента часового ряду; c – константа

На виході з мережі отримуємо нормовані дані, тому необхідно за допомогою формули (10) перетворити вихідні значення навантаження.

$$x = \tilde{x}(M + c). \quad (10)$$

Під час навчання нейронної мережі використовувалась сигмоїдальна функція активації нейронів, а для оптимізації параметрів моделі було обрано алгоритм Левенберга-Маркварда зі зворотнім розповсюдженням помилки.

Результати моделювання розробленої нейронної мережі для прогнозування наступні: похибки перевірконого (validation) та тестового (test) наборів вихідних даних мають аналогічну динаміку, а також не спостерігається їх збільшення зі зростанням кількості ітерацій навчання; найкращий результат спостерігався на 314 ітерації; відносне значення похибки симуляційного прогнозування вимірювальної інформації не перевищило $\pm 0,5\%$.

Результат проведення навчання нейронної мережі та тестування дозволили отримати прогнозні значення частки різних типів трафіку в загальному навантаженні, що представлені на рисунку 4.

Отримані результати показують, що прогнозування телекомунікаційного трафіку за допомогою нейромереж дозволяє визначати періоди істотної зміни часткового співвідношення трафіків різних типів і на основі цього виконувати динамічний перерозподіл пропускної здатності супутникових каналів зв'язку.

У таблиці 2 представлені результати розрахунку пропускної здатності каналу зв'язку для передачі голосового трафіку при різних значеннях параметрів навантаження і обмежень на затримку пакетів. Аналогічно в таблиці 3 і 4 представлені результати розрахунку пропускної здатності каналу зв'язку для передачі трафіку, що формується переглядом відео-файлу в режимі реального часу та Internet-трафіку.

Рисунок 4 – Результати прогнозного значення частки різних типів трафіку в загальному навантаженні

Таблиця 2 – Результати розрахунку пропускної здатності каналу зв'язку для передачі голосового трафіку

Довжина пакету $L_i=64$ байт		Пропускна здатність			
Додаткова затримка, мс	Інтенсивність, c^{-1}	Частка голосового трафіку	V_i , кбіт/с	V_{min} , кбіт/с	Ефективність, %
0,1	40	0,285905192	1337,7503	1449,5431	8,356777
	45	0,341217755	1551,7193	1498,6501	3,420024
	30	0,226633839	1052,3517	1341,0849	27,43695
	30	0,239176449	1066,0192	1341,0849	25,80307
	35	0,347308995	1317,9566	1397,2582	6,017015
	45	0,237988365	1355,7894	1498,6501	10,53709
	30	0,458309572	1335,3427	1341,0849	0,430018
	42	0,156637676	1172,1503	1469,5348	25,37085
	50	0,241575005	1455,8131	1545,0967	6,132905
	35	0,525357155	1602,6326	1397,2582	12,81481
0,4	50	0,285905192	1346,4398	995,54175	26,06118
	45	0,341217755	1365,0864	958,82251	29,76104
	25	0,226633839	777,31397	785,96443	1,112865
	20	0,239176449	691,48285	732,54834	5,938758
	35	0,347308995	1142,6866	878,66518	23,10532
	47	0,237988365	1185,2815	973,74347	17,84707
	30	0,458309572	1180,8732	834,25626	29,3526

Таблиця 3 – Результати розрахунку пропускної здатності каналу зв'язку для передачі для трафіку, що формується переглядом відео в режимі реального часу

Довжина пакету $L_i=16$ байт		Пропускна здатність			
Додаткова затримка, мс	Інтенсивність, c^{-1}	Частка IP-TV трафіку	V_i , кбіт/с	V_{min} , кбіт/с	Ефективність, %
1	2	3	4	5	7
0,15	100	0,199621714	536,2356	480	10,48711
	100	0,163518882	497,7247	480	3,561142
	100	0,435353936	830,211	480	42,18337
	100	0,011158932	361,7579	480	32,68543
	100	0,213772215	551,9102	480	13,02933
	100	0,247320227	590,2841	480	18,68322
	100	0,044649149	387,7409	480	23,794
	100	0,108425112	443,3883	480	8,257248
0,4	100	0,354453705	722,6059	480	33,57375
	100	0,253987538	598,1033	480	19,7463
	100	0,199621714	468,6876	322,9822	31,08796
	100	0,163518882	427,0034	322,9822	24,36074
	100	0,435353936	782,7344	322,9822	58,73668
	100	0,011158932	282,1516	322,9822	14,47117
	100	0,213772215	485,647	322,9822	33,49445
	100	0,247320227	527,1017	322,9822	38,72488
	100	0,044649149	309,1894	322,9822	4,460949
	100	0,108425112	368,3777	322,9822	12,32308
	100	0,354453705	668,8922	322,9822	51,71386
	100	0,253987538	535,5337	322,9822	39,68966

Таблиця 4 – Результати розрахунку пропускної здатності каналу зв'язку для передачі Internet-трафіку

Довжина пакету $L_i=1370$ байт		Пропускна здатність			
Додаткова затримка, мс	Інтенсивність, c^{-1}	Частка Internet трафіку	V_i , кбіт/с	V_{min} , кбіт/с	Ефективність, %
0,15	30	0,514473094	22073,68	20954,45	5,070428
	30	0,495263364	21654,89	20954,45	3,234535
	30	0,338012225	18446,74	20954,45	13,59434
	30	0,749664619	27579,18	20954,45	24,02075
	30	0,438918791	20458,59	20954,45	2,423733
	30	0,514691408	22078,47	20954,45	5,091024
	30	0,497041279	21693,42	20954,45	3,406421
	30	0,734937212	27216,79	20954,45	23,0091
	30	0,40397129	19742,04	20954,45	6,14127
	30	0,220655306	16342,31	20954,45	28,22208

Продовження таблиці 4

Довжина пакету $L_i=1370$ байт		Пропускна здатність			
Додаткова затримка, мс	Інтенсивність, c^{-1}	Частка Internet трафіку	V_i , кбіт/с	V_{min} , кбіт/с	Ефективність, %
0,4	30	0,514473094	19775,58	13035,25	34,08409
	30	0,495263364	19317,53	13035,25	32,52112
	30	0,338012225	15785,58	13035,25	17,42305
	30	0,749664619	25719,92	13035,25	49,31846
	30	0,438918791	18004,78	13035,25	27,60115
	30	0,514691408	19780,82	13035,25	34,10153
	30	0,497041279	19359,71	13035,25	32,66814
	30	0,734937212	25332,86	13035,25	48,54408
	30	0,40397129	17215,73	13035,25	24,28287
	30	0,220655306	13461,68	13035,25	3,167685

Аналіз отриманих результатів показує, що введення пріоритетного управління трафіком дозволяє знизити вимоги до пропускної здатності каналів зв'язку, при цьому:

– збільшення допустимої затримки в k раз вимагає збільшення пропускної здатності каналу менш ніж в k раз;

– зі збільшенням навантаження (інтенсивності λ) збільшується ефект від введення пріоритетного управління трафіком;

– зі зменшенням часткового співвідношення трафіків різних типів в загальному навантаженні цей ефект зменшується.

Таким чином, завдяки наявності прогнозу, ми змогли отримати максимальне і мінімальне значення пропускної здатності для різних видів трафіку, тим самим зменшивши ризик втрат та перевантажень, та оптимізувавши пропускну здатність каналу.

Висновки.

З метою дослідження статистичних характеристик потоків ССЗ, в тому числі ступеня їх самоподібності, в роботі проведено моделювання трьох типів трафіку: трафік Internet (передача даних), трафік, що формується переглядом відео-файлу в режимі реального часу та голосовий трафік. Зазначені моделі дозволяють враховувати такі властивості, характерні потокам в мультисервісних мережах: довготривалу залежність, високу пачковість, наявність розподілу з важкими хвостами для міжпакетних інтервалів.

Для того, щоб підвищити показники якості обслуговування та ефективно розподілити пропускну здатність супутникового каналу була вирішена задача прогнозування надходження трафіку в ССЗ та вдалося отримати прогнозне значення часткового співвідношення трафіків різних типів в загальному навантаженні

Розроблена в статті математична модель розрахунку середньої затримки пакетів певного типу з урахуванням самоподібних процесів дозволила отримати значення максимальної і мінімальної пропускної здатності для різних видів трафіку, а також пропускної здатності супутникового каналу.

За результатами дослідження ефективності запропонованого методу пріоритетного управління встановлено, що даний метод дозволяє більш ефективно здійснювати перерозподіл пропускної здатності каналу 16% для голосового трафіку, на 25% для трафіку, що формується переглядом відео в режимі реального часу та на 21% для Internet трафіку в порівнянні з класичними моделями та методами безпріоритетного управління.

Запропоновані в роботі математичні моделі і методи можуть знайти своє застосування

при розробці автоматизованих систем проектування супутникових мереж зв'язку, що дозволить підвищити якість прийнятих проектних рішень з економічної і технічної точки зору, а також можуть бути використані операторами зв'язку та Інтернет-провайдерами як можливість динамічно керувати пропускну здатністю супутникового каналу за пріоритетною ознакою.

Перелік використаної літератури

1. Храмов, В.Ю. Состояние и перспективы развития систем спутниковой связи тактического звена управления США и стран НАТО / В. Ю. Храмов, П. А. Чепурнов // Информация и космос. – 2016. – № 2. – С. 22-26.
2. Методика краткосрочного прогнозирования трафика телекоммуникационных сетей / [Е. Г. Игнатенко, И. В. Дегтяренко, Н. В. Червинская и др.] // Збірник наукових праць ДонІЗТ. – 2011. – № 28. – С. 102-108.
3. Кравчук, С.А. Анализ направлений повышения эффективности функционирования современных систем спутниковой связи / С. А. Кравчук, Д. А. Миночкин, О. Я. Сова // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2013. – № 2 (11). – С. 140-147.
4. Максименко, А.В. Сравнение методов распределения ресурса ретранслятора при обслуживании многоприоритетного трафика в сетях спутниковой связи / А. В. Максименко // Информационные системы и технологии. – 2013. – № 3 (77). – С. 85-90.
5. Resource allocation for non-delay-sensitive satellite services using adaptive coding and modulation–multiple-input and multiple-output–orthogonal frequency division multiplexing / [N. Mokari, P. Haji-pour, L. Mohammadi et al.] // IET Commun. – 2016. – Vol. 10 (3). – P. 309-315.
6. Новиков, Е.А. Применение моделей структурной динамики при решении задачи распределения частотно-временного ресурса сети спутниковой связи на основе стандарта DVB-RCS / Е. А. Новиков // Информационно-управляющие системы. – 2013. – № 3. – С. 78-83.
7. Chabaa, S. Identification and Prediction of Internet traffic Using Artificial Neural Networks / S. Chabaa, A. Zeroual, J. Antari // Intelligent Learning Systems & Applications. – 2010. – № 2. – P. 147-155. DOI: 10.4236/jilsa.2010.23018.
8. Gowrishankar, S.A Time Series Modeling and Prediction of Wireless Network Traffic / S. Gowrishankar, P.S. Satyanarayana // International Journal of Interactive Mobile Technologies. – 2009. – Vol. 4, № 1. – P. 53-62. DOI: 10.3991/ijim.v3i1.284.
9. Теорія телетрафіку : навчальний посібник / [В. Я. Воропаєва, В. І. Бессараб, В. В. Турупалов, В. В. Червинський]. – Донецьк : ДонНТУ, 2011. – 202 с.
10. Mulla A. S. Queue Management Policies / A. S. Mulla, B. T. Jadhav // International Journal of Latest Trends in Engineering and Technology (IJLTET). – 2014. - Vol. 3. – P. 31-34.
11. Ложковский, А.Г. Теория массового обслуживания в телекоммуникациях: учебник / А. Г. Ложковский. – Одесса : ОНАС им. А. С. Попова, 2012. – 112 с.
12. Shahaf, I. Resource Management in Satellite Communication Systems: Heuristic Schemes and Algorithms / I. Shahaf, Wayer and Arie Reichman // Journal of Electrical and Computer Engineering. – 2012. – Vol. 2012. – P. 10.
13. Мошенченко, М.С. Штучні нейронні мережі / М. С. Мошенченко // Topical problems of modern science. – 2017. – Vol. 4. – P. 47-49.
14. Сравнительный анализ методов прогнозирования трафика в телекоммуникационных системах / [К. М. Руккас, Ю. В. Соляник, К. А. Овчинников и др.] // Электронное научное специализированное издание – журнал «Проблемы телекоммуникаций». – 2014. – № 1 (13). – С. 84-95.
15. Diaconescu, E. The use of NARX Neural Networks to predict Chaotic Time Series / E. Diaconescu // Wseas transactions on computer research – 2008. – Vol. 3. – P. 182-191.

16. Жуковська, Д.О. Використання нейронних мереж для підвищення показників ефективності супутникового каналу / Д.О. Жуковська, А.А. Несвітаєв, В.Я. Воропаєва // Автоматизація, контроль та управління: пошук ідей та рішень (АКУ-2018) : IV Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих учених, аспірантів та студентів, Покровськ, 22–23 травня 2018 р. : тези доповідей. – Покровськ: ДонНТУ, 2018. – С. 85–89.
17. Киреева, Н.В. Частный случай исследования параметров трафика сети для определения законов распределения времени передачи пакетов / Н.В. Киреева, Л.Р. Чупахина // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2015. – № 5. – С. 395-398.
18. Муравьева-Витковская, Л.А. Методы исследования процессов управления неоднородным трафиком в телекоммуникационных системах : автореф. дис. ... к-та техн. наук : 05.13.13 «Телекоммуникационные системы и компьютерные сети» / Л. А. Муравьева-Витковская. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2007. – 20 с

References

1. Xramov V. Yu., Chepurnov P. A. Sostoyanie i perspektivy razvitiya sistem sputnikovoy svyazi takticheskogo zvena upravleniya SShA i stran NATO, Informaciya i kosmos, 2016, No. 2, pp. 22-26.
2. Ignatenko E. G., Degtyarenko I. V., Chervinskaya N. V. Metodika kratkosrochnogo prognozirovaniya trafika telekommunikacionnyx setej, Zbirnik naukovix prac' DonIZT, 2011, No 28, pp. 102-108.
3. Kravchuk S. A., Minochkin D. A., Sova O. Ya. Analiz na-pravlenij povysheniya e'ffektivnosti funkcionirovaniya sovremennyx sistem sputnikovoy svyazi, Nauka i tekhnika Povitryanix Sil Zbrojnix Sil Ukraїni, 2013, No 2 (11), pp. 140-147.
4. Maksimenko A. V. Sravnenie metodov raspredeleniya resursa retranslyatora pri obsluzhivanii mnogoprioritetnogo trafika v setyax sputnikovoy svyazi, Informacionnye sistemy i tehnologi, 2013, No 3 (77), pp. 85-90.
5. Mokari N., Hajipour P., Mohammadi L. Resource allocation for non-delay-sensitive satellite services using adaptive coding and modulation–multiple-input and multiple-output–orthogonal frequency division multiplexing, IET Commun, 2016, Vol. 10 (3), pp. 309-315.
6. Novikov E. A. Primenenie modelej strukturnoj dinamiki pri reshenii zadachi raspredeleniya chastotno-vremennogo resursa seti sputnikovoy svyazi na osnove standarta DVB-RCS, Informacionno-upravlyayushhie sistemy, 2013, No 3, pp. 78-83.
7. Chabaa S., Zeroual A., Antari J. Identification and Prediction of Internet traffic Using Artificial Neural Networks, Intelligent Learning Systems & Applications, 2010, No 2, pp. 147-155. DOI: 10.4236/jilsa.2010.23018.
8. Gowrishankar S., Satyanarayana P. S. A Time Series Modeling and Prediction of Wireless Network Traffic, International Journal of Interactive Mobile Technologies, 2009, Vol. 4, No 1, pp. 53-62. DOI: 10.3991/ijim.v3i1.284.
9. Voropayeva V. Ya., Bessarab V. I., Turupalov V. V., Chervinskij V. V. Teoriya teletrafiku : navchal'nij posibnik, Donec'k, DonNTU, 2011, 202 p.
10. Mulla A. S., Jadhav B. T. Queue Management Policies, International Journal of Latest Trends in Engineering and Technology (IJLTET), 2014, Vol. 3, pp. 31-34.
11. Lozhkovskij A. G. Teoriya massovogo obsluzhivaniya v telekommunikaciyax: uchebnik, Odessa, ONAS im. A. S. Popova, 2012, 112 p.
12. Shahaf I., Wayer and Arie Reichman Resource Management in Satellite Communication Systems: Heuristic Schemes and Algorithms, Journal of Electrical and Computer Engineering, 2012, Vol. 2012, pp. 10.

13. Moshchenko M. S. Shtuchni nejronni merezhi, Topical problems of modern science, 2017, Vol. 4, pp. 47-49.
14. Rukkas K. M., Solyanik Yu. V., Ovchinnikov K. A. Sravni-tel'nyj analiz metodov prognozirovaniya trafika v tele-kommunikacionnyx sistemax, E'lektronnoe nauchnoe specializirovannoe izdanie – zhurnal «Problemy telekommunikacij», 2014, No 1 (13), pp. 84-95.
15. Diaconescu E. The use of NARX Neural Networks to pre-dict Chaotic Time Series, Wseas transactions on computer research, 2008, Vol. 3, pp. 182-191.
16. Zhukovska D. O., Nesvitaev A. A., Voropayeva V. Ya. Vikoristannya nejronnix merezh dlya pidvishhennya pokaznikiv effektivnosti suputnikovogo kanalu, Avtomatizaciya, kontrol' ta upravlinnya: poshuk idej ta rishen' (AKU-2018). IV Vseukraïns'ka naukovo-texnichna konferenciya molodix uchenix, aspirantiv ta studentiv, Po-krovs'k, DonNTU, 2018, pp. 85–89.
17. Kireeva N. V., Chupaxina L. R. Chastnyj sluchaj issledo-vaniya parametrov trafika seti dlya opredeleniya zakonov raspredeleniya vremeni peredachi paketov, Mezhdunarodnyj zhurnal prikladnix i fundamental'nix issledovanij, 2015, No 5, pp. 395-398.
18. Murav'eva-Vitkovskaya L. A. Metody issledovaniya pro-cessov upravleniya neodnorodnym trafikom v telekommu-nikacionnyx sistemax, avtoref. dis. ... k-ta texn. nauk : 05.13.13 «Telekommunikacionnye sistemy i komp'yuternye seti», Sankt-Peterburg, 2007, 20 p.

Д.А. Жуковская, В.Я. Воропаева

Донецкий национальный технический университет

Метод приоритетного управления радиоресурсом спутникового канала на основе прогнозирования входящего трафика

Предложен метод прогнозирования телекоммуникационного трафика с помощью нейронных сетей с использованием нелинейной авторегрессионной модели, позволяющей получить прогнозное значение периодов существенных изменений долевого соотношения трафиков разных типов для дальнейшего использования при динамическом распределении пропускной способности спутникового канала связи. На основе полученного прогноза реализована модель приоритетного управления трафиком в спутниковом канале связи, позволяющей определить пропускную способность канала и оценить эффект, который достигается за счет использования приоритетного управления. Проведена оценка эффективности от введения приоритетного управления трафиком. Данный метод позволяет разработать управляющее воздействие на параметры системы с целью повышения эффективности распределения радиоресурса спутниковых каналов связи.

Ключевые слова: спутниковый канал связи, эффективность, управление, прогнозирование, нейронная сеть, моделирование, авторегрессия, пропускная способность, приоритет, трафик.

D. Zhukovska, V. Voropaeva

Donetsk National Technical University

Method of priority management of the satellite channel radio resource on the basis of forecasting incoming traffic

The existing technical solutions for the distribution of radio resources of satellite communication systems are static in nature and do not take into account traffic fluctuations of different priorities associated with its fractal characteristics. Solving this problem requires the construction of a special class of models that are able to take into account the properties of traffic, especially the heterogeneity of its individual types and, on the basis of this, make a dynamic redistribution of the bandwidth of satellite communication channels. A method for predicting telecommunication traffic using neural networks using a nonlinear autoregressive model is pro-posed, which makes it possible to obtain the predicted value of periods of significant changes in the proportion of traffic of different types for further use in the dynamic allocation of the capacity of the satellite

communication channel. Based on the received forecast, the model of priority traffic control in the satellite communication channel is realized, which makes it possible to determine the channel capacity and to estimate the effect achieved through the use of priority control. The analysis was carried out and the types of traffic distributions were determined with the help of which a training sample of data was generated. A method and a prediction algorithm based on a neural network is developed. The maximum and minimum values of the required bandwidth for different types of traffic are determined, as well as the capacity of the satellite channel. The effective-ness of the introduction of priority traffic management was evaluated. This method allows us to develop a control effect on the parameters of the system in order to improve the efficiency of radio resource distribution of satellite communication channels. A model for estimating and predicting the number of requests of a certain priority using a neural network using non-linear autoregressive with external inputs (NARX) is developed. The proposed model of priority control in a satellite communication channel that allows you to determine the share of traffic of a certain priority and based on this, distribute the bandwidth of the channel and assess the effect that is achieved through the use of priority traffic management.

Keywords: satellite communication channel, efficiency, management, forecasting, neural network, modeling, autoregression, bandwidth, priority, traffic.

Жуковська Дар'я Олександрівна, Україна, закінчила Донецький національний технічний університет, асистент кафедри автоматики і телекомунікацій ДВНЗ «Донецький національний технічний університет» (пл. Шибанкова, 2, м. Покровськ, Донецька обл., 85300, Україна).

Основний напрямок наукової діяльності – оптимальне управління трафіком в гетерогенних телекомунікаційних мережах.

Воропаєва Вікторія Яківна, Україна, закінчила Донецький національний технічний університет, к.т.н., доцент, проректор з науково-педагогічної роботи ДВНЗ «Донецький національний технічний університет» (пл. Шибанкова, 2, м. Покровськ, Донецька обл., 85300, Україна).

Основний напрямок наукової діяльності – сучасна теорія телетрафіка, оптимізація телекомунікаційних та інформаційно-комунікаційних систем і мереж.