

Зв'язок, телекомунікації та радіотехніка

УДК 621.39 + 004.057.4 + 519.21

doi: 10.26906/SUNZ.2024.1.185

В. М. Воронець, П. Є. Пустовойтов

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

МЕТОД ФОРМУВАННЯ ПЛАНУ ПЕРЕДАЧІ ПАКЕТІВ ПРИ ПІКОВОМУ НАВАНТАЖЕННІ МЕРЕЖІ, ЯКИЙ ЗНИЖУЄ ВІДГУК

Анотація. У представленій статті висвітлено новий підхід до вирішення проблеми оптимізації послідовності передачі групи пакетів у мережі з урахуванням затримки, яка динамічно змінюється у вузлах системи. Автори пропонують використовувати метод мінімаксу для визначення оптимального значення критерію, який моделює динаміку затримки. Важливою частиною методу є декомпозиція вихідної задачі на послідовні двоіндексні підзадачі "про призначення". Ефективність запропонованого підходу підтверджена результатами імітаційного моделювання, що підкреслює його потенційну застосовність у реальних умовах мережевих систем. Показано, що ефективність методу становиться вище, коли кількість пакетів, що передаються, збільшується, та тим більше ефективність, чим більше варіація затримки пакетів у мережі. Таким чином, стаття внесла вагомий вклад у розробку методів оптимізації передачі даних у мережах зі змінною динамікою затримки.

Ключові слова: мережний трафік, пікові навантаження, затримка пакета, якість обслуговування.

Актуальність дослідження

Актуальність проблеми управління чергами пакетів у вузлах мережі визначається стрімким ростом обсягу даних та збільшенням завдань, які потребують обробки у реальному часі. Збільшення кількості підключених пристроїв, швидкість передачі даних та розширення функціональності мережевих додатків створюють великий тиск на ефективність управління чергами пакетів. Недостатня пропускна спроможність та неправильна пріоритизація трафіку можуть впливати на якість обслуговування користувачів, спричиняти затримки та погіршувати загальну продуктивність мережі.

Таким чином, вирішення проблем управління чергами пакетів є ключовим аспектом для забезпечення стабільності та оптимальної продуктивності сучасних мереж.

Задача управління чергами пакетів полягає в ефективному розподілі та обробці мережевого трафіку в умовах обмежених ресурсів. Основна мета - запобігти перевантаженню мережевих вузлів, забезпечити справедливий доступ до ресурсів для різних типів трафіку та підтримати найвищий рівень обслуговування для важливих додатків чи послуг. Це включає в себе механізми керування чергами, пріоритизації пакетів, контроль за пропускною здатністю та уникнення затримок, що можуть виникнути в результаті конфліктів в розподілі ресурсів. Задача стає особливо важливою в умовах зростаючого обсягу даних та вимог до якості обслуговування в сучасних мережах.

1. Огляд літератури

Для зменшення затримки пакетів у мережах розглядають аспекти, спрямовані на забезпечення ефективності та якості обслуговування (QoS) [1]. Традиційно у мережах визначають різні класи трафіку та встановлюють пріоритети [2] для обробки, щоб

надати важливим додаткам чи послугам перевагу під час передачі даних.

Класифікація трафіку зазвичай відбувається на мережевому рівні моделі OSI (Open Systems Interconnection) [3]. Протокол IP (Internet Protocol), включає поле TOS (Type of Service) чи DSCP (Differentiated Services Code Point), яке використовується для призначення різних класів обслуговування та пріоритетів трафіку в мережі [4].

Хоча поле TOS (Type of Service) байту в заголовку IP-пакету визначає клас обслуговування для пакету, включаючи пріоритети, інші параметри та характеристики, воно само по собі не гарантує вирішення проблем затримок пакетів в мережі. Поле TOS заголовку IP пакету може вказувати на певний клас обслуговування, але він не гарантує конкретних параметрів якості обслуговування, таких як максимальна затримка чи гарантована пропускна здатність [5, 6]. Затримки в мережі можуть виникати через різноманітні причини, такі як переповнення маршрутизаторів, шум на лініях передачі даних або конфлікти ресурсів [7, 8] і поле TOS не може управляти всіма цими аспектами. Також мережі можуть бути дуже неоднорідними, і затримки можуть змінюватися в різних частинах мережі. Поле TOS може надати позначку класу обслуговування, але не завжди гарантує, що цей клас буде однаково врахований на всьому маршруті [9, 10].

Для більш ефективного управління затримками часто використовуються комбіновані підходи, які включають в себе QoS-технології разом із спеціальними механізмами маршрутизації та управління чергами для досягнення кращої продуктивності та надійності мережі.

2. Постановка завдання дослідження

Мета та задачі дослідження. Розробка ефективних методів управління чергами для запобігання переповненню та забезпечення справедливого

доступу до ресурсів для різних користувачів та додатків – одна з найважливіших проблем в мережах електронної комунікації. Для роботи таких методів необхідний постійний моніторинг та аналіз факторів, які впливають на затримки в мережі, для вчасного виявлення проблем та впровадження відповідних коректив, наприклад, вибору ефективних маршрутів для пакетів з метою мінімізації затримок та оптимізації шляхів передачі даних за певними критеріями.

У роботі розглядається спільний критерій мережі – сумарна довжина затримки пакетів, який має велике значення в сфері онлайн управління рухомими об'єктами, оскільки це впливає на реакційний час та загальну ефективність системи.

У зв'язку з цим, **метою статті** є пошук раціональної організації роботи при передачі сукупності пакетів від одного джерела різним адресатам.

В контексті сучасних вимог до мережевого обміну даними та зростаючої потреби в ефективній комунікації, важливо визначити оптимальні методи передачі інформації, що дозволяють забезпечити швидкість, надійність та ефективність обслуговування різних отримувачів. Розглядаються аспекти, пов'язані з оптимізацією передачі пакетів у мережах, з метою вдосконалення загального функціонування систем передачі даних.

Досягнення мети дослідження виконується за рахунок виконання **задач**:

визначення сукупності пакетів та їх характеристик,

визначення вектору порядку передачі пакетів, оптимізація порядку передачі пакетів, аналіз результатів оптимізації.

Ці **задачі** спрямовані на створення ефективної та стабільної мережевої інфраструктури, яка задовольняє вимогам сучасних користувачів та застосунків.

Завдання дослідження. Нехай є джерело пакетів, які потрібно передати різним споживачам. Розглянемо задачу відшукування оптимального порядку передачі цих пакетів у припущенні, що кожне з них буде доставлено адресату за оптимальним маршрутом.

Для вирішення задачі передачі сукупності m пакетів будемо виходити з того, що відомий закон $g_k(t)$, $k = 1, 2, \dots, K$ зміни у часі довжини черги пакетів на усіх проміжних вузлах мережі. Тоді, використовуючи алгоритм Дейкстри [11, 12] чи Нелдера-Мідда [13] для усіх пакетів, що передаються, можна знайти маршрут, що мінімізує час доставки пакета до одержувача.

Нехай для передачі m пакетів обрано деяку початкову послідовність їх передачі. Така послідовність може бути задана в такий спосіб. Для кожного пакету введемо персональний індикатор x_{ij} , який дорівнює 1, якщо i -й пакет передається j -м за порядком, та дорівнює 0 в іншому випадку.

Тоді введена матриця $X = (x_{ij})$ однозначно задає послідовність передачі пакетів у мережі, якщо

для сукупності (x_{ij}) , $i = 1, 2, \dots, m$, $j = 1, 2, \dots, m$, виконуються обмеження:

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = 1, \quad j = 1, 2, \dots, m, \quad (1)$$

$$\sum_{j=1}^m x_{ij} = 1, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad (2)$$

$$x_{ij} \in \{0; 1\}, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad j = 1, 2, \dots, m. \quad (3)$$

Виконання наведеної сукупності обмежень (1) означає, що на кожне, наприклад, j -е місце в послідовності пакетів, що передаються, призначено для передавання тільки один пакет. Аналогічним чином сукупність обмежень (2) визначає, що кожному пакету з сукупності передачі m призначено тільки одне місце.

Приймемо, що довжини пакетів не дуже відрізняються одна від одної і тривалість передачі для будь-якого з пакетів дорівнює Δ . Тоді під час передачі i -го пакета j -м (тобто для пари (i, j) , що має значення $x_{ij} = 1$) за порядком знайдемо найкоротший маршрут, який починається в момент $T_j = T_0 + (j-1)\Delta$, та відповідний цьому маршруту час затримки доставки T_{ij} пакета цільовому хосту. T_0 – момент початку передачі набору пакетів. Розв'язуючи задачу для всіх пар (i, j) , $i = 1, 2, \dots, m$, $j = 1, 2, \dots, m$, будеться матриця $T = (T_{ij})$.

Для вирішення задачі треба розглянути $m!$ різноманітних послідовностей передачі пакетів. Очевидно, що для реальної кількості пакетів m у системі та обмежень на час виконання оптимізації виконувати повний перебір не має перспективи. Тому у роботі пропонується метод пошуку найкращого порядку передачі сукупності пакетів, а критерієм оптимізації пропонується максимальний час доставки пакета. При цьому для обраного плану передачі $X = (x_{ij})$ значення критерію розраховується, як

$$\eta(X) = \max_{i,j} \{T_{ij}x_{ij}\}. \quad (4)$$

3. Загальні результати

Метод визначення оптимального порядку передачі пакетів полягає у наступному, необхідно знайти план послідовності відправки $X = (x_{ij})$, що мінімізує критерій (4) та задовольняє обмеженням (1) – (3). Отримана задача є мінімаксною задачею «про призначення» [14]. Для її вирішення пропонується така методика.

Упорядкуємо вихідну множину значень T_{ij} , $i = 1, 2, \dots, m$, $j = 1, 2, \dots, m$ таким чином:

$$T_{i_1j_1} \geq T_{i_2j_2} \geq \dots \geq T_{i_qj_q} \geq \dots \geq T_{i_mj_m}. \quad (5)$$

Із кожним елементом $T_{i_q j_q}$, $q \in \{1, 2, \dots, m^2\}$, пов'яжемо двоіндексну матрицю $D^{(q)} = (d_{ij}^{(q)})$, компоненти якої задаються співвідношенням

$$d_{ij}^{(q)} = \begin{cases} T_{ij}, & \text{якщо } T_{ij} < T_{i_q j_q}, \\ M, & \text{якщо } T_{ij} \geq T_{i_q j_q}, \end{cases} \quad (6)$$

тут M – достатньо велике значення (наприклад, нехай $M = m^2 \max_{ij} \{T_{ij}\}$).

Розглянемо випадок $q = 1$. Тут у матриці $D^{(1)} = (d_{ij}^{(1)})$ буде всього один елемент, що дорівнює M , який розташовано на позиції i_1, j_1 .

Розв'яжемо тепер задачу пошуку набору $X = (x_{ij})$, який мінімізує

$$L(X) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m d_{ij}^{(1)} x_{ij} \quad (7)$$

та задовольняє обмеженням (1) – (3).

Така задача «про призначення» традиційно вирішується «угорським» методом [14].

Якщо при цьому значення $L(X_1^*)$ у оптимального плану задачі (1) – (3), (7) менше за M , то це значить, що існує певний порядок передачі пакетів, при якому максимальний час передачі менше за $T_{i_1 j_1}$.

Розглянемо тепер випадок $q = 2$. У відповідній матриці

$$D^{(2)} = (d_{ij}^{(2)})$$

буде вже два елемента, які знаходяться на відповідних місцях (i_1, j_1) , (i_2, j_2) , та дорівнюють M . Знов використаємо «угорський» метод для розв'язання задачі «про призначення» із відповідною матрицею $D^{(2)}$. Аналогічно попередньому випадку, із виконання нерівності $L(X_2^*) < M$ виходить, що отриманий на цьому кроці порядок передачі пакетів X_2^* забезпечує їх передачу за час, що не перевищує $T_{i_2 j_2}$.

Продовжуючи розв'язання задачі дійдемо до деякого значення $q = \tilde{q}$, такого, що $L(X_{\tilde{q}}) < M$, але $L(X_{\tilde{q}+1}) > M$.

Це означає, що існує такий порядок передачі пакетів, в якому максимальний час передачі не перевищує $T_{i_{\tilde{q}} j_{\tilde{q}}}$, але не існує порядку, для якого максимальний час менший або дорівнює $T_{i_{\tilde{q}+1} j_{\tilde{q}+1}}$. Таким чином, отримуємо план $X_{\tilde{q}}^*$ який є розв'язанням вихідної мінімаксної задачі (1) – (4), який шукали.

4. Аналіз результатів дослідження

Проведемо оцінку доцільності використання запропонованого методу оптимізації порядку передачі пакетів. З цією метою здійснимо імітаційне моделювання вузла мережі на певному інтервалі часу його функціонування, він передаватиме m пакетів із різними $g_k(t)$ законами зміни в часі довжини черги пакетів, які очікують на початок обслуговування в проміжних вузлах.

Зрозуміло, що використання раціонального порядку передачі пакетів тим більше доцільно, чим вище варіабельність функції $g_k(t)$, що виявляється в відмінностях величини затримки T_{ij} доставки пакетів, які передаються різними за порядком.

Для оцінювання рівня варіабельності введемо показник

$$\xi = \frac{\max_i \{ \max_j T_{ij} - \min_j T_{ij} \}}{\frac{1}{m^2} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m T_{ij}}. \quad (8)$$

Для оцінки рівня доцільності оптимізації порядку передачі пакетів введемо показник

$$\zeta(X^*) = \frac{\max_{ij} T_{ij}}{\max_{ij} T_{ij} X_{ij}^*}. \quad (9)$$

Чисельник цього співвідношення визначає максимальну затримку доставки у випадку, коли пакети передаються відповідно до їх початкових номерів. В знаменнику (9) стоїть максимальна затримка доставки, яка відповідає оптимальному порядку передачі пакетів у мережі, що моделюється.

Результати моделювання для різних значень кількості пакетів m , що пересилаються мережею наведено на рис. 1.

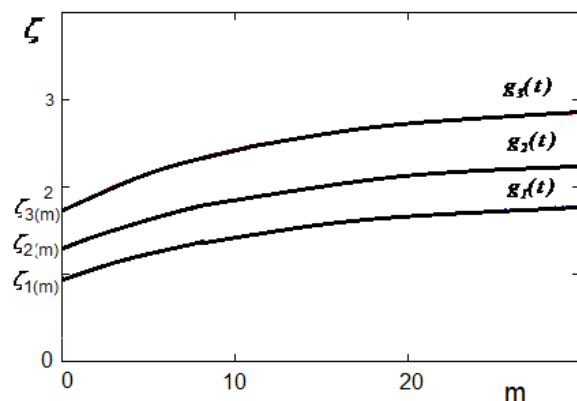


Рис. 1. Залежність рівня доцільності оптимізації ζ від кількості пакетів m для різних значень варіації випадкової величини $g_k(t)$

Аналіз наведених кривих дозволяє зробити наступний висновок: виграш ζ , який дає оптимізація порядку передачі пакетів зростає із збільшенням

кількості пакетів m , що передаються, і збільшенням рівня варіабельності довжини черги пакетів $g_k(t)$, що очікують обслуговування в проміжних вузлах.

Висновки

У роботі запропоновано метод розв'язання задачі оптимізації порядку передачі сукупності пакетів з урахуванням динаміки затримки пакетів у вузлах мережі.

При розв'язанні задачі запропоновано критерій, оптимальне значення якого розраховується методом мінімаксу.

Показано, що вихідна задача зводиться докомпозицією до послідовності двоіндексних підзадач «про призначення».

Доцільність оптимізації порядку передачі підтверджена імітаційним моделюванням.

Багато систем управління рухомими об'єктами, такі як автомобільні системи безпеки, дрони, системи телемедицини тощо, вимагають реального часу для надання швидкої та точної реакції на події. Низькі затримки передачі пакетів мережею дозволяють системі сприймати, аналізувати та реагувати на зміни в реальному часі.

У сферах, де важлива точність руху, таких як автономні транспортні засоби або навігація дронів, затримки в передачі даних можуть впливати на точність прогнозування руху та управління маршрутом.

Враховуючи ці фактори, важливо розробити та впроваджувати методи оптимізації мережевих та комунікаційних технологій, які забезпечують мінімальні затримки для забезпечення ефективного та безпечного управління рухомими об'єктами в режимі реального часу.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. QoS: Congestion Management Configuration Guide, Cisco IOS XE Everest 16.5, Cisco Systems, Inc., 2019.
2. Пустовойтов П. Е., Раскин Л. Г. "Дисциплина обслуживания в мультисервисных сетях, минимизирующая максимальную задержку." Проблемы телекоммуникаций. – 2013. – № 1 (10). – С. 66 – 71.
3. Оптимизация порядка передачи сообщений в узлах компьютерных сетей с учетом динамики трафика / П.Е. Пустовойтов, Л.Г. Раскин // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2013. — № 3. — С. 53-57.
4. Пустовойтов, П. Е. Модель узла компьютерной сети с повторной передачей утерянных пакетов / П. Е. Пустовойтов // Прикладная радиоэлектроника: науч.-техн. журн. – X. : ХНУРЭ, 2012. – Т. 11, № 1. – С. 87–90.
5. Pustovoitov, P., Okhrimenko, M., Voronets, V., & Udalov, D. (2021). The speed calculating increasing method of the markov model network node. *Advanced Information Systems*, 5(3), 13–17. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.3.02>.
6. Kovalenko, A., Kuchuk, H., Kuchuk, N. and Kostolny, J. (2021), "Horizontal scaling method for a hyperconverged network", *2021 International Conference on Information and Digital Technologies (IDT)*, Zilina, Slovakia, doi: <https://doi.org/10.1109/IDT52577.2021.9497534>
7. Yang, S., Xu, C., Zhong, L., Shen, J., Muntean, G. M. (2019), "A QoE-Driven Multicast Strategy With Segment Routing—A Novel Multimedia Traffic Engineering Paradigm", *IEEE Transactions on Broadcasting*, No. 66(1), P. 34-46. DOI: <https://doi.org/10.1109/TBC.2019.2932338>.
8. Kuchuk, N., Kovalenko, A., Ruban, I., Shyshatskyi, A., Zakovorotnyi, O. And Sheviakov, I. (2023), "Traffic Modeling for the Industrial Internet of NanoThings", *2023 IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology, KhPI Week 2023 - Conference Proceedings*, 194480, doi: <http://dx.doi.org/10.1109/KhPIWeek61412.2023.10312856>
9. O. Lemeshko and V. Sterin, "Design and structural-functional optimization transport telecommunication network", XIIth International conference the experience of designing and CAD system (CADSM'2013), pp. 208-210, February 2013.
10. Коваленко А. А., Кучук Г. А. Методи синтезу інформаційної та технічної структур системи управління об'єктом критичного застосування. *Сучасні інформаційні системи*. 2018. Т. 2, № 1. С. 22–27. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.1.04>
11. O.V. Lemeshko, S.V. Garkusha, O.S. Yermenko and A.M. Hailan, "Policy-based QoS management model for multiservice networks", *International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON'2013)*, pp. 1-4, May 2015.
12. Зиков І. С., Кучук Н. Г., Шматков С. І. Синтез архітектури комп'ютерної системи управління транзакціями e-learning. *Сучасні інформаційні системи*. 2018. Т. 2, № 3. С. 60–66. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.3.10>
13. O. Lemeshko and O. Drobot, "A Mathematical Model of Multipath QoS-based Routing in Multiservice Networks", *Modern Problems of Radio Engineering Telecommunications and Computer Science (TCSET'2006)*, pp. 72-74, February 2006.
14. R.E. Burkard, M. Dell'Amico, S. Martello: *Assignment Problems* (Revised reprint). SIAM, Philadelphia (PA.) 2012.

Received (Надійшла) 25.11.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 31.01.2024

A method for forming a packet transmission plan at peak network load which reduces feedback

V. Voronets, P. Pustovoitov

Abstract. The presented article highlights a new approach to solving the problem of optimizing the sequence of transmission of a group of packets in the network, taking into account the delay that dynamically changes in the nodes of the system. The authors suggest using the minimax method to determine the optimal value of the criterion that models the delay dynamics. An important part of the method is the decomposition of the original problem into successive two-index subproblems "about the destination". The effectiveness of the proposed approach is confirmed by the results of simulation modeling, which emphasizes its potential applicability in real conditions of network systems. It is shown that the efficiency of the method becomes higher when the number of transmitted packets increases, and the greater the efficiency, the greater the variation of packet delay in the network. Thus, the article made a significant contribution to the development of methods for optimizing data transmission in networks with variable delay dynamics.

Keywords: network traffic, peak loads, packet delay, quality of service.