

Толстікова О.В., к.т.н.,

orcid.org/0000-0002-7616-2757,

e-mail: olena.tolstikova@npp.kai.edu.ua,

Водоп'янов С.В., к.т.н.,

orcid.org/0009-0006-0424-6173,

e-mail: serhii.vodopianov@npp.kai.edu.ua,

Андрєєв О.В., к.т.н.,

orcid.org/0000-0001-9032-1139,

e-mail: oleksandr.andreiev@npp.kai.edu.ua,

Дрововозов В.І., к.т.н.,

orcid.org/0000-0002-6303-9741,

e-mail: volodymyr.drovovozov@npp.kai.edu.ua

ВДОСКОНАЛЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ТАБЛИЦІ МАРШРУТИЗАЦІЇ З УРАХУВАННЯМ ПСИХОФІЗІОЛОГІЧНИХ МЕХАНІЗМІВ РЕАКЦІЇ АДМІНІСТРАТОРА КОМП'ЮТЕРНОЇ МЕРЕЖІ

Державний університет «Київський авіаційний інститут»

Вступ

Для того, щоб за адресою мережі призначення можна було б вибрати раціональний маршрут подальшого проходження пакету, кожен кінцевий вузол і маршрутизатор створюють спеціальну інформаційну структуру, яка називається таблицею маршрутизації (ТМ). Структура ТМ залежить від типу використовуваної операційної системи, стека протоколів передачі даних, способу реалізації (апаратна або програмна) маршрутизатора і інших чинників, в тому числі людського чинника [1, 2].

Найпоширенішими є алгоритми адаптивної (або динамічної) маршрутизації. Ці алгоритми забезпечують автоматичне оновлення таблиць маршрутизації після зміни конфігурації мережі. Протоколи, побудовані на основі адаптивних алгоритмів, дозволяють всім маршрутизаторам збирати інформацію про топологію зв'язків в мережі, оперативно відпрацьовувати всі зміни конфігурації зв'язків. У ТМ при адаптивній маршрутизації звичайно є інформація про інтервал часу, протягом якого даний маршрут залишатиметься дійсним. Цей час називають часом життя маршруту (*Time-To-Live, TTL*).

Адаптивні алгоритми маршрутизації звичайно мають розподілений характер і мають відповідати декільком важливим вимогам. По-перше, вони повинні забезпечувати, якщо не оптимальність, то хоча б раціональність маршруту. По-друге, алгоритми повинні бути достатньо простими, щоб при їх реалізації не витрачалися дуже багато мережних ресурсів, зокрема, вони не повинні вимагати дуже великого об'єму обчислень або породжувати інтенсивний службовий трафік. І, нарешті, алгоритми маршрутизації повинні володіти властивістю збіжності, тобто завжди приводити до однозначного результату за прийнятний час.

Початкові параметри адаптивного алгоритму маршрутизації

Для якнайповнішої порівняльної оцінки ефективності того або іншого маршруту, крім метрики, доцільно враховувати так звану адміністративну відстань (АВ) – параметр (метрика) маршруту, за допомогою якого визначається ступінь довіри до інформації, одержаної від сусідніх пристроїв. Виражається АВ цілим числом від 0 до 255, де нуль означає найбільшу довіру, а 255 – заборону передачі трафіку по даному маршруту.

Стандартні значення АВ визначені для джерел, починаючи від приєднаного інтерфейсу (0), статичного маршруту (1), внутрішніх і зовнішніх маршрутів

стандартних протоколів маршрутизації (від 5 до 200) і аж до невідомого джерела (255) (табл. 1).

Таблиця 1. Стандартні адміністративні відстані

Параметр (метрика) маршруту	Адміністративна відстань
Безпосередньо підключений маршрут	0
Статичний маршрут	1
Сумарний маршрут, оголошений протоколом <i>EIGRP</i>	5
Зовнішній маршрут, оголошений протоколом <i>BGP</i>	20
Внутрішній маршрут, оголошений протоколом <i>EIGRP</i>	90
Маршрут, оголошений протоколом <i>IGRP</i>	100
Маршрут, оголошений протоколом <i>OSPF</i>	110
Маршрут, оголошений протоколом <i>IS-IS</i>	115
Маршрут, оголошений протоколом <i>RIP</i>	120
Маршрут, оголошений протоколом <i>EGP</i>	140
Зовнішній маршрут, оголошений протоколом <i>EIGRP</i>	170
Внутрішній маршрут, оголошений протоколом <i>BGP</i>	200
Невідомий маршрут	255

Постановка задачі оптимізації топологічної структури мережі

Задачу оптимізації топологічної структури мережі поставимо таким чином. Є наступні вектори:

\vec{U} – вектор параметрів мережного навантаження: інтенсивності потоків даних між кожною парою сусідніх вузлів комутації, статистичні характеристики трафіку, пріоритети або деякі вагові функції окремих потоків даних;

\vec{Q} – вектор параметрів якості сервісу мережі: швидкодія, достовірність і ін., які характеризують якість передачі даних або, в традиційному трактуванні – якість сервісу *QoS* ;

\vec{W} – вектор експлуатаційних характеристик мережі: пропускна спроможність каналів передачі даних, швидкодія і об'єми буферної пам'яті вузлів комутації, надійність і час відновлення устаткування, вагові коефіцієнти, за допомогою яких даються порівняльні оцінки параметрів логічних зв'язків між вузлами мережі.

Накладаються (векторні) обмеження на граничні характеристики мережного обладнання, зокрема на загальну вартість і структуру мережі:

$$C_i(\vec{U}, \vec{Q}, \vec{W}) \leq C_{i_{max}}, i = \overline{1, N_c}, \quad (1)$$

де, N_c – число елементів множин C_i і $C_{i_{max}}$.

Нарешті, накладаються обмеження на технічну архітектуру мережі, що витікають з умов фізичної і практичної реалізації: гранично досяжна швидкість передачі даних, максимально допустимі відстані між вузлами, мінімально досяжні затримки в комутаційному обладнанні, рівень взаємних завад і т.д. Позначимо безліч цих обмежень через R_{max} :

$$R(\vec{U}, \vec{Q}, \vec{W}) \in R_{max} . \quad (2)$$

Потрібно знайти такий набір векторів, який доставляв би екстремум функціоналу нормованої ефективності:

$$\Psi_{en}(\vec{U}, \vec{Q}, \vec{W}) \xrightarrow[\substack{\vec{U}=\vec{U}_{opt} \\ \vec{Q}=\vec{Q}_{opt} \\ \vec{W}=\vec{W}_{opt}}]{\rightarrow} \max \quad (3)$$

при обмеженнях вигляду (1-2).

Сформульована задача має вельми абстрактний вигляд. Щоб конкретизувати її, необхідно задати всі необхідні початкові дані і задати цільову функцію. Цей вибір досить складний і неоднозначний, тому керуватимемося загальними постулатами теорії великих систем. По досвіду практичної експлуатації таких систем відомо, що втрати (витрати), як правило, є квадратичними функціями відхилень від оптимуму. Тому для попереднього розгляду візьмемо у якості цільової функції квадратичну функцію втрат наступного вигляду:

$$\Psi(N_n, N_{cl} | S_i) = \Psi \left\{ a_i \left[1 - \left(\frac{|N_n - N_{cl}|}{N_n} \right) \right]^2 | S_i \right\} \quad (4)$$

де, N_n, N_{cl} – число байт корисних і службових повідомлень відповідно, переданих за одиницю часу; S_i – i -та структура мережі; a_i – масштабний коефіцієнт, вибраний з практичних міркувань.

З урахуванням приведених міркувань запишемо вираз для функціонала якості вибору маршруту в наступному вигляді:

$$\Psi_{en} = \Psi \left(\sum_{i=1}^{N_c} v_i m_i \right), \quad (5)$$

де, m_i – компоненти метрики V_{ki} i -го маршруту, $i = \overline{1, N_c}$; v_i – вагові коефіцієнти, які в загальному випадку задовольняють умові нормування $\sum_{i=1}^{N_c} v_i = 1$.

Як наголошувалося раніше, одним з компонентів метрики V_{ki} є адміністративна відстань, величина якого призначається, виходячи з практичних міркувань, в межах від 0 до 255. Для виконання умов нормування функціонала (5) введемо функцію адміністративної відстані

$$\psi(A_d) = 1 + \log_2(1 + A_d) = 1/m_j, \quad (6)$$

де, m_j – компонент метрики маршруту, пов'язаний з адміністративною відстанню; індекс j може мати значення від 1 до N_c . Оскільки адміністративна відстань A_d лежить в межах від 0 до 255, то значення, відповідно, змінюватимуться від 1 до 9.

Інформаційна цінність параметра A_d залежить від його величини: при $A_d = 0$ інформація про стан маршруту вважається абсолютно достовірною; при $A_d = 255$ інформація про стан маршруту вважається абсолютно недостовірною і відкидається. Тому у якості кількісної оцінки достовірності інформації про адміністративну відстань можна вибрати ентропійну міру Шеннона [5] або зіставити з достовірністю значення (у загальному випадку – вибрану деяким чином функцію) вагового коефіцієнта v_j . У якості функції v_j можна узяти функцію вигляду:

$$\varphi(v_j) = c_j \{1 - [\Psi(A_d) - 1]/8\}, \quad n = 2k, \quad k \geq 1, \quad (7)$$

де, c_j – коефіцієнт нормування.

Вибір функції адміністративної відстані $\psi(A_d)$ у вигляді (6) продиктований наступними міркуваннями.

По-перше, в методі аналізу ієрархій вибрана верхня межа шкали, рівна 9. Приводяться наступні обґрунтування такого вибору [4].

1. Використовування шкали парних порівнянь в діапазоні від 0 до ∞ може виявитися даремним, оскільки при цьому передбачається, що людська думка якимсь чином здатна оцінити відносну перевагу будь-яких двох об'єктів, що зовсім не так. Як добре відомо з досвіду, наша здатність розрізняти знаходиться у вельми обмеженому діапазоні, і коли є значна невідповідність між порівнюваними об'єктами або діями, наші припущення тяжіють до свавілля, і звичайно виявляються далекими від дійсності. Це підтверджує думку про те, що наші шкали повинні мати кінцевий діапазон.

2. Якісні відмінності значущі на практиці і володіють елементом точності, коли величина порівнюваних предметів одного порядку або предмети близькі щодо властивості, використаної для порівняння. Психологічна межа 7 ± 2 градацій при одночасному порівнянні пояснюється тим фактом, що якщо узяти 7 ± 2 окремих об'єктів з близькими властивостями, то

знадобиться не більш 9 точок, щоб розрізнити їх.

3. Здатність людини виробляти якісні порівняння об'єктів або явищ обмежується наступними рамками: рівність, слабка, сильна, дуже сильна і абсолютна перевага. Можна прийняти компромісні визначення між сусідніми визначеннями, коли потрібна більша точність. В цілому потрібно дев'ять значень, і вони можуть бути добре узгоджені; одержувана в результаті шкала підтверджується практикою.

Практичний метод, часто використовуваний для оцінки окремих предметів, полягає в класифікації стимулів в трихотомію зон: неприйняття, байдужості, ухвалення. Для тоншої класифікації в кожному з цих зон також закладений принцип трихотомії – розподіл на низький, помірний і високий ступені. Таким чином, виходить дев'ять відтінків значущих особливостей.

По-друге, відповідно до закону Вебера-Фехнера реакції R людини на зовнішні подразники s_e описуються лінійною функцією логарифма інтенсивності подразника:

$$R = a \log s_e + b, \quad a \neq 0, \quad (8)$$

де a і b – константи, вибрані з практичних міркувань. Решта компонентів m_i , $i = \overline{1, N_c}$, $i \neq j$ метрик V_{ki} вибирається, виходячи з порівняльних експертних оцінок переваг кожного з можливих маршрутів.

На рис. 1 зображено графік залежності затримки $\tau_R(x, N_p)$ інтуїтивної реакції оператора на відносну величину x подразника та на логарифм метрики N_p адміністративної відстані (АВ). Чим більше зростає шкала АВ, тим важче оператору вчасно реагувати на зовнішні подразники.

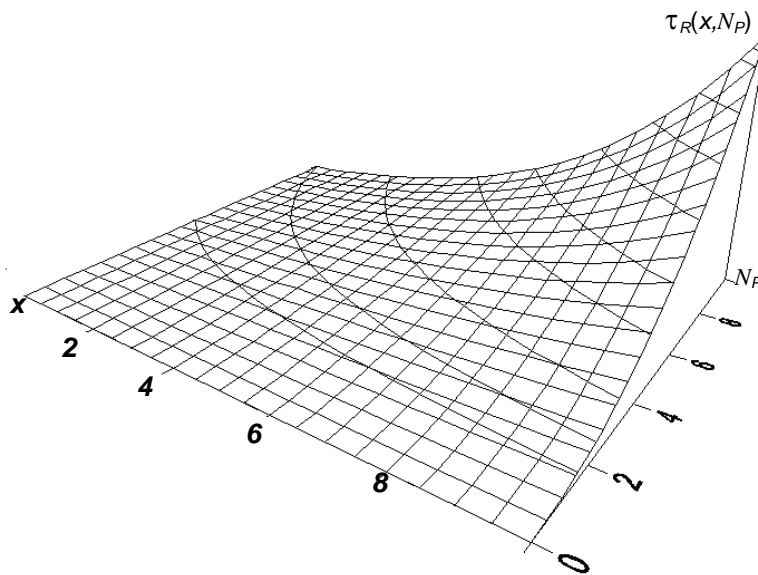


Рис. 1. Залежність затримки $\tau_R(x, N_p)$ інтуїтивної реакції оператора на відносну величину x подразника та на логарифм метрики N_p адміністративної відстані

Розрахунки та комп'ютерне моделювання [6] показують, що завдяки оптимізації топологічної структури мережі з поточним вибором найкращого маршруту кількісні характеристики функціонала якості покращуються не менш, чим на 5%-7% (у порівнянні з простим вибором топології мережі).

Легко помітити очевидну відповідність вибраної апроксимації (6) психофізичному закону Вебера-Фехнера. Крім того, при застосуванні закону Вебера-Фехнера спостерігається 10...15-відсоткове прискорення інтуїтивних реакцій адміністратора мережі на раптові збудження, що дає додатковий вииграш у зниженні затримок

адаптації до змін маршрутів приблизно на 2%-3%.

Висновки

При застосуванні методів адаптивної маршрутизації, з одного боку, розширюються можливості вибору найбільш прийнятних маршрутів, а з іншого боку, ускладнюються методи управління комп'ютерною мережею. Ця суперечність особливо яскраво проявляється у гетерогенних комп'ютерних мережах з різномірним трафіком.

Для усунення або хоча б пом'якшення цієї суперечності треба якомога більше спрощувати методи аналітичного оцінювання ієрархій та пріоритетів. У представленій роботі врахований формальний зв'язок між шкалами ієрархій та психофізіологічними характеристиками людини-оператора (для задачі, що розглядається – адміністратора комп'ютерної мережі). Зменшення масштабу функції адміністративної відстані веде до прискорення інтуїтивних реакцій оператора на раптові збудження, отже, на досягнення можливостей роботи у реальному часі.

Завдяки оптимізації топологічної структури мережі з поточним вибором найкращого маршруту та застосуванням закону Вебера-Фехнера кількісні характеристики функціонала якості покращуються не менш, ніж на 5%-7% (у порівнянні з фіксованою топологією мережі).

Таким чином, розв'язання задачі оптимізації топологічної структури мережі з обмеженнями на граничні характеристики мережного устаткування дає можливості пом'якшити вплив зростання мережного навантаження на негативні зміни результуючої якості сервісу. У подальшому планується розробляти методи подальшого

спрощення функцій збудження, наприклад, шляхом кусково-лінійної апроксимації, що особливо привабливо при малих відмінностях (перевагах) одного фактору над іншим.

Література

1. Sheridan T. B., Ferrell W. R. Man-Machine Systems: Information, Control, and Decision Models of Human Performance. MIT Press, 1981. 472 p.
2. Mgbemena, C. E. et al. Man-Machine Systems: A Review of Current Trends and Applications. *FUPRE Journal of Scientific and Industrial Research*. 2020. Vol. 4(2). P. 91–117.
3. Gebru B. et al. A Review on Human–Machine Trust Evaluation: Human-Centric and Machine-Centric Perspectives. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*. 2022. Vol. 52, iss. 5. P. 952–962.
4. Soret B. et al. Fundamental tradeoffs among reliability, latency and throughput in cellular networks. *2014 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps) : proceedings, Austin, TX, USA, 08–12 December 2014 / IEEE*. 2014. P. 1391–1396. DOI: 10.1109/GLOCOMW.2014.7063628.
5. Resende M. G. C. Handbook of Optimization in Telecommunications / M. G. C. Resende, P. M. Pardalos (eds.) New York : Springer Science+Business Media, Inc., 2006. 1134 p.
6. Скрипніченко А. А. Методи адаптивного формування трафіку комп'ютерних мереж за умов граничного навантаження. Дис. ... доктора філософії за спеціальністю 126 – Інформаційні системи та технології. Військовий інститут Київського національного університету імені Тараса Шевченка, 2025. 166 с.

Толстікова О.В., Водоп'янов С.В., Андреев О.В., Дрововозов В.І.

ВДОСКОНАЛЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ТАБЛИЦІ МАРШРУТИЗАЦІЇ З УРАХУВАННЯМ ПСИХОФІЗІОЛОГІЧНИХ МЕХАНІЗМІВ РЕАКЦІЇ АДМІНІСТРАТОРА КОМП'ЮТЕРНОЇ МЕРЕЖІ

У представленій роботі розглянуто задачу оптимізації топологічної структури мережі. При цьому використано удосконалену логарифмічну функцію адміністративної відстані, яка відповідає фундаментальному закону аналізу систем “людина-машина” –

закону Вебера-Фехнера. Результати розрахунків та комп'ютерного моделювання свідчать, що інтуїтивні реакції адміністратора комп'ютерної мережі на зміни логарифму адміністративної відстані прискорюються при застосуванні адміністративних відстаней закону Вебера-Фехнера спостерігається приблизно 10...15-відсоткове прискорення інтуїтивних реакцій адміністратора мережі на раптові збудження, що дає додатковий виграш у зниженні затримок адаптації до змін маршрутів приблизно на 2%-3%.

Ключові слова: топологічна структура; адаптивна маршрутизація; адміністративна відстань; психофізіологічні характеристики; закон Вебера-Фехнера.

Tolstikova O.V., Vodopianov S.V., Andreiev O.V., Drovovozov V.I.

IMPROVEMENT OF THE MATHEMATICAL MODEL OF THE ROUTING TABLE TAKING INTO ACCOUNT THE PSYCHOPHYSIOLOGICAL MECHANISMS OF THE REACTION OF THE COMPUTER NETWORK ADMINISTRATOR

The presented work considers the problem of optimizing the topological structure of the network. In this case, an improved logarithmic function of the administrative distance was used, which corresponds to the fundamental law of the analysis of "man-machine" systems – the Weber-Fechner law. The results of calculations and computer modeling indicate that the intuitive reactions of the computer network administrator to changes in the logarithm of the administrative distance are accelerated when applying the administrative distances of the Weber-Fechner law, an approximately 10...15 percent acceleration of the intuitive reactions of the network administrator to sudden excitations is observed, which gives an additional gain in reducing the delays of adaptation to route changes by approximately 2%-3%.

Keywords: topological structure; adaptive routing; administrative distance; psychophysiological characteristics; Weber-Fechner law.