УДК 004.023

А.Р. Карапетян

Черкаський державний технологічний університет, Черкаси

ЕВОЛЮЦІЙНІ МЕТОДИ В ЗАДАЧАХ АДАПТИВНОЇ МАРШРУТИЗАЦІЇ ДАНИХ

В статті представлені існуючі методи застосування моделей, побудованих на основі нейронної мережі Хопфілда та генетичних алгоритмів, для визначення оптимального маршруту. Розглянуто можливість використання еволюційних методів. Проаналізовано обчислювальну складність при використанні функції енергії для активації нейронної мережі та генетичного алгоритму в мережах з адаптивною маршрутизацією.

***Ключові слова**: методи маршрутизація, адаптивна маршрутизація, багатокритеріальна оптимізація, нейронні мережі, генетичний алгоритм.*

Вступ

Постановка проблеми. Інтенсивне зростання складності комп'ютерних мереж вимагає розробки паралельних алгоритмів маршрутизації для визначення маршрутів передачі даних у мережі, які характеризуються максимальною пропускною здатністю, або мінімальним часом затримки. Через складну структуру сучасних комп'ютерних мереж, задача маршрутизації не вирішується повною мірою. У більшості випадків це пов'язано з маршрутизаторами, які не спроможні підтримувати таблиці маршрутизації і обирати оптимальний маршрут для даного класу трафіку. Задачі планування роботи мережевих пристроїв та вибору маршруту відносять до класу комбинаторно-оптимізаційних задач, для яких не можна знайти прості аналітичні розв'язки. Досягти рівня адекватності математичного опису мережі можливо лише в рамках моделей, що враховують особливості динамічного функціонування системи. Обчислювальні затрати на розв'язання таких задач експоненційно зростають із ростом розмірності оброблюваних графів. Тому виникає актуальна необхідність формування нових підходів та алгоритмів розв'язання задач пошуку оптимальних шляхів з багатьма критеріями, одним із яких є еволюційні методи.

Аналіз публікацій і досліджень. До недавнього часу теорія телетрафіку забезпечувала теоретичну базу для проектування і моделювання систем розподілу інформаційних потоків, що отримала свій розвиток в роботах ряду авторів: Л. Клейнрока, Г.П. Башарина та ін. [3]. Стаціонарний пуассонівський потік, відповідний для мереж з комутацією каналів є найбільш поширеною моделлю потоку викликів в теорії телетрафіку. У роботах зарубіжних дослідників (W. Leland, D. Wilson, I. Noros) стверджується, що трафік в мережах з комутацією пакетів має так звану властивість «самоподібності» [1]. У результаті, теоретичні розрахунки характеристик сучасних систем розподілу інформації за класичними формулами дають некоректні результати щодо довжин черг і часу затримок пакетів [2].

Таким чином, розробка моделей і алгоритмів маршрутизації, які зможуть враховувати завантаженість ліній і «самоподібність» трафіку є актуальною.

Метою даної роботи є аналіз існуючих методів маршрутизації та дослідження ефективності використання мережних ресурсів у розподілених мережах за допомогою еволюційних алгоритмів.

Основний матеріал

Особливості адаптивної маршрутизації в порівнянні із статичною або динамічною:

- алгоритми адаптивної маршрутизації вимагають обліку і обробки поточної інформації про реальний стан мережі;
- передача інформації про поточний стан або структурні зміни в мережі, необхідної для адаптивної маршрутизації, додатково завантажує мережу та призводить до затримок;
- збільшення завантаження мережі і часу затримки може призвести до коливань або автоколивань і до збільшення кількості операцій при визначенні оптимального маршруту.

Задачу керування потоками даних можна розв'язувати за допомогою методів оптимізації процесів маршрутизації з використанням нейромережевих технологій. Нейронні мережі (НМ) є ефективною обчислювальною моделлю апроксимування функцій будь-якої складності, що ґрунтується на неповній інформації.

В якості математичної моделі статичної комп'ютерної мережі, комунікаційні характеристики якої не змінюються з часом, розглядатимемо граф

$$G= G(V, E(V)), \tag{1}$$

де V – множина вузлів; E – впорядкована множина направлених дуг.

Визначимо набір параметрів, що характеризують комунікаційні можливості мережі. Розглянемо множину пар вузлів граф G виду

$$D_0 = \{(s,d)|s,d \in V,\ s \neq d\}, \quad (2)$$

де перший елемент пари є вузлом-джерелом необхідних даних, а другий — вузлом-одержувачем запитаних даних.

Побудуємо нейронну мережу для даної моделі.

Розглянемо оптимізаційне завдання:

$$F \rightarrow \min \quad (3)$$

при таких обмеженнях:

$$\Gamma^{T} x = \Phi, \quad x \geq 0. \quad (4)$$

Дана задача має принаймні один розв'язок при виконанні наступних умов:

1. Середня вартість маршруту визначається як сума вартостей навантажень на його ребра (канали зв'язків), тобто

$$T_p = \sum_{l \in E(V)} \delta_{lp} T_l(p_l).$$

2. Для будь-якого ребра $l \in E(V)$ справедливим є

$$T_l: [0, \infty) \rightarrow [0, \infty] \text{ и } T_l(0) < \infty.$$

3. Для кожного ребра $l \in E(V)$ функція $T_l(p_l)$ опукла та або строго монотонно зростає на інтервалі, де $T_l(p_l) < \infty$, або $T_l(p_l) = \text{const}$.

4. Функція $T_l(p_l)$ безперервна на всій області визначення, причому на інтервалі, де $T_l(p_l) < \infty$, вона неперервно диференційовна.

Для всіх розв'язків значення вектору розподілу навантажень **p** будуть одними і тими ж.

Розглянемо систему:

$$F = \sum_{p \in \Pi} \frac{x_p}{\Phi(D)} T_p = \frac{1}{\Phi(D)} \sum_{l \in E(V)} \rho_l T_l(\rho_l). \quad (5)$$

Оскільки для конкретної множини $D \subset D_0$ значенням функції Φ_D є додатня константа, то

$$F\Phi_D = \sum_{l \in E(V)} \rho_l T_l(\rho_l) \quad (6)$$

Введемо матрицю Т виду

$$\Delta = \begin{pmatrix} \delta_{11} & \delta_{12} & \cdots \\ \delta_{21} & \delta_{22} & \cdots \\ \vdots & \vdots & \ddots \end{pmatrix} \quad (7)$$

де δ_{ij} — частка інтенсивності інформаційного потоку Xj.

Оскільки $\rho_l = \rho_l(x)$, то завдання (3) – (4) можна переформулювати таким чином:

$$F\Phi_D \rightarrow \min \quad (8)$$

при обмеженнях:

$$\Gamma^T x = \Phi;\ \Delta x = \rho;\ x \geq 0 \quad (9)$$

Як можливі розв'язки задач (8), (9) шукатимемо вектори (ρ, x) за умови , що $0 < \rho < 1$ та $0 < x < 1$.

Побудуємо енергетичну функцію $E=E(\rho,x)$ для НМ, таку щоб вона була квадратичною формою від (ρ, x). Спочатку розглянемо функцію E_0:

$$E_0 = \frac{\alpha_{11}}{2}\left(\sum_{l \in E(V)} \rho_l T_l(\rho_l)\right)^2 + \sum_{d \in D} \frac{\alpha_{2d}}{2}\left(\sum_{p \in \Pi} \gamma_{pd} x_p - \phi_d\right)^2 + \sum_{l \in E(V)} \frac{\alpha_{2l}}{2}\left(\sum_{p \in \Pi} \delta_{lp} x_p - \rho_l\right)^2, \quad (10)$$

де α_{ij} – деякі додатні константи, причому α_{ij} – достатньо мале число. Проте E_0 не є квадратичною формою, оскільки в першій сумі присутні нелінійні елементи $T_l(p_l)$.

Замінимо першу суму в (10) на квадрат лінійної комбінації р. одержимо наступну енергетичну функцію:

$$E_0 = \frac{\alpha_{11}}{2}\left(\sum_{l \in E(V)} \rho_l T_l(\rho_l)\right)^2 + \sum_{d \in D} \frac{\alpha_{2d}}{2}\left(\sum_{p \in \Pi} \gamma_{pd} x_p - \phi_d\right)^2 + \sum_{l \in E(V)} \frac{\alpha_{2l}}{2}\left(\sum_{p \in \Pi} \delta_{lp} x_p - \rho_l\right)^2, \quad (11)$$

де параметри $c_l \geq 0$ і достатньо малі.

Заміна (10) на (11) допустима, оскільки для двох строго зростаючих функцій з однаковими областями визначення екстремуми досяжні в однакових точках.

Таким чином, синтезована модель НМ, що складається з $|E| + |\Pi|$ нейронів, де Π – впорядкована множина всіх маршрутів для всіх пар вузлів, а E– множина ребер графа відповідної КМ. Ця модель НМ орієнтована на централізовану схему маршрутизації [1].

Розглянемо завдання локальної оптимізації

$$(T(x) - \Gamma A(x))x = 0;$$
$$T(x) - \Gamma A(x) \geq 0;$$
$$\Gamma^T x - \varphi = 0;\ x \geq 0, \quad (12)$$

для розподіленої схеми маршрутизації. При виконанні умов 1-4 ця задача має, принаймні, один розв'язок. Розглянемо перше рівняння системи (12). Через другу і четверту нерівності системи одержимо, що для будь-якого x справедлива нерівність виду $(T(x) - \Gamma A(x))\, x \geq 0$.

Тому невід'ємна функція $(T(x) - \Gamma(x))x$ приймає нульові значення (з урахуванням решти обмежень) в точках можливих розв'язків нерівностей (12). Тобто точки мінімумів даної функції співпадають з розв'язками оптимізаційної задачі (12). Враховуючи (12) і те, що

$$T(x)x - \Gamma A(x)x = (F\Phi_D) - \Gamma A(x)x, \qquad (13)$$

переформулюємо задачу (1.6) таким чином:

$$F\Phi_D — \Gamma A(x)x \to \min;$$

$$T(x) - \Gamma A(x) \geq 0; \quad \Gamma^T x - \varphi = 0; \quad x \geq 0. \qquad (14)$$

Цю задачу можна звести до наступної:

$$F\Phi_D — \Gamma A(x)\,x \to \min;$$

$$T(x) - \Gamma A(x) - z = 0; \quad \Gamma^T x - \varphi = 0;\ x \geq 0,\ z \geq 0. \qquad (15)$$

Відмітимо, що $z_p = 0$, якщо

$$T_p(x) = (\Gamma A(x))_p.$$

Тому з урахуванням $x_p \geq 0$ і $z_p > 0$ одержимо, що

$$T_p(x) > (TA(x))_p \text{ і } x_p = 0.$$

Побудуємо НМ, що розв'язує оптимізаційне завдання (15). Як можливі розв'язки шукатимемо вектори (x,r), вражаючи, що $0 \leq x \leq 1$ і $0 \leq z \leq 1$.

З першої рівності в системі обмежень витікає, що

$$F\Phi_D - \Gamma A(x)x = zx.$$

Таким чином, енергетична функція E для НМ набуватиме наступного вигляду:

$$E = \alpha_{11}\left(\sum_{p\in\Pi} z_p x_p\right) + \sum_{d\in D}\frac{\alpha_{3d}}{2}\left(\sum_{p\in\Pi}\gamma_{pd}x_p - \phi_d\right)^2 +$$

$$+ \sum_{l\in E(V)}\frac{\alpha_{2p}}{2}\left(T_p(x) - \sum_{p\in\Pi}\gamma_{pd}A_d - z_d\right)^2.$$

Модель НМ з енергетичною функцією (15) складається з 2 |П| нейронів, де П — впорядкована множина всіх маршрутів для всіх пар вузлів КМ. Ця НМ орієнтована на розв'язання задачі локальної оптимізації для розподіленої схеми маршрутизації.

Дослідження показали можливість застосування запропонованих модифікацій НМ для розв'язку завдань маршрутизації потоків даних як у статичних,так і у динамічних КМ. Недоліком запропонованого методу нейромережевої маршрутизації для розподіленої схеми є великий об'єм попередніх обчислень.

Розглянемо загальний випадок векторної багатокритеріальної задачі. Знайти

$$\min f(x) = [f_1(x), f_2(x), ..., f_k(x)].$$

Тут $x = [x_1, x_2, ..., x_i, ..., x_n]^T$ – вектор розв'язків, $i = 1, 2, ..., n$, n – кількість змінних; $x \in X$, де $X \subset R^n$ – множина допустимих рішень; $f_j(x)$ – j-й критерій оцінювання, $j = 1, 2, ..., k$. Вектор $f(x)$ називається критеріальним вектором, а $f(X) = Y \subset R^k$ – множиною допустимих оцінок, де R^k – критеріальний простір.

Оскільки багатокритеріальна оптимізація полягає в пошуку оптимального рішення, що задовольняє одночасно більш ніж одну цільову функцію, то для знаходження компромісного рішення в багатокритеріальних моделях в теорії оптимізації введено поняття рішення оптимального за Парето, яке відоме також як покращене рішення або не домінуюче рішення. Формальне визначення Парето-оптимального рішення задачі сформульовано наступним чином:

Генетичні алгоритми добре зарекомендували себе в якості методик пошуку у багатьох областях практично при повній відсутності інформації про властивості цільової функцій і обмежень. В різних дослідженнях було розроблено декілька методів і підходів використання генетичних алгоритмів для розв'язання багатокритеріальної оптимізації.

Розглянемо формалізовану задачу пошуку оптимального шляху на графі (1). В загальному випадку існує декілька вагових функцій $\omega_1, ..., \omega_k : E \to R$, кожна з яких відповідає певному критерію оптимізації.

Довільний шлях $p = v_i \to v_j$ складається з послідовності ребер $\langle v_i, v_l\rangle, ..., \langle v_k, v_j\rangle \in E$ і може бути представлений у вигляді послідовності вершин графа, що належать шляху .

Нехай індекс s відповідає початковій, а d – кінцевим вершинам шуканого шляху $p = v_i \to v_j$. Визначимо:

$$x_{i,j} = \begin{cases} 1, & \text{якщо ребро } (i,j) \text{ входить до шляху;} \\ 0 - \text{в іншому випадку.} \end{cases}$$

Нехай загальна кількість критеріїв оптимізації задачі k. За кожним критерієм можна обчислити певний функціонал (цільову фітнес-функцію), який відповідає якості шляху з точки зору алгоритму маршрутизації і визначається як:

$$C_m(p) = F_m(\omega_m(i,j), x_{i,j}),\ m = 1...k,\ (i,j) \in E.$$

Для адитивних характеристик шляху (затримка, довжина), що використовуються як метрики сучасних алгоритмів маршрутизації, F_m є сумою значень вагової функції ребер, які входять до шляху p. Для неадитивних характеристик шляху (пропускна спроможність, надійність, навантаження) функціонал F_m є складною функцією від багатьох параметрів і може враховувати не тільки стан з'єднань, але й стан маршрутизаторів мережі, зміну середовища передачі даних та ін.

Позначимо множину всіх можливих шляхів між вершинами v_s та v_d як P. В загальному випадку задача про найкоротший шлях між двома визначеними вершинами в графі з багатьма критеріями може бути сформульована таким чином:

$$\min_P C_m(p) = F_m(\omega_m(i,j), x_{i,j}), \qquad (16)$$
$$m = 1...k,\ (i,j) \in E,$$

$$\sum_{j=s,\ j\neq i}^{d} x_{i,j} - \sum_{j=s,\ j\neq i}^{d} x_{ji,i} = \begin{cases} 1, & \text{якщо } i = s, \\ -1, & \text{якщо } i = d, \\ 0 - \text{в іншому випадку}, \end{cases} \qquad (17)$$

$$\sum_{j=s,\ j\neq i}^{d} x_{i,j} = \begin{cases} \leq 1, & \text{якщо} \quad i \neq d; \\ 0, & \text{якщо} \quad i = d. \end{cases} \qquad (18)$$

Умови (17) та (18) вимагають, щоб шуканий шлях не містив циклів. Умова (16) вимагає, щоб цільова функція за кожним критерієм оптимізації по всіх можливих шляхах $p = v_s \to v_d \in P$ досягала найменшого значення на шуканому шляху.

До кожного покоління розв'язків (хромосом) застосовуються операції кросоверу та мутації. Імовірність застосування цих операцій до певної хромосоми в запропонованій моделі не залежить від пристосованості моделі і позначають P_c та P_m відповідно. У [5] було проведено генетичні операції кросоверу, мутації та відбору. Внаслідок операції кросоверу можливе формування шляхів, що містять цикли. Оскільки такі шляхи не задовольняють умову (17) задачі, їх необхідно відкинути і виключити з множини розв'язків. Тому після операції кросоверу всі хромосоми-нащадки підлягають перевірці на присутність циклів у відповідних їм шляхах на графі. Хромосоми, що не проходять перевірку, відкидаються і не приймають участі в операції відбору.

Як і при операції кросоверу, результат операції мутації також може не задовольняти умову (17) задачі. В цьому випадку, аналогічно попередньому, вводиться операція перевірки результату, а розв'язки, що містять цикли, відкидаються.

Для операції відбору було використано турнірний метод, що не має необхідності обрахунку функції пристосованості в цілому, що значно спрощує саму процедуру відбору.

Висновки

В роботі запропоновані нейромережі та генетичний алгоритм для розв'язання задачі оптимізації за багатьма параметрами, проведено теоретичні оцінки складності, узагальнено задачу пошуку найкоротших шляхів на графі з кількома критеріями та сформовано підходи до її формалізації. На основі виконаних досліджень зроблено висновок, що еволюційні методи є досить потужним математичним інструментом і можуть з успіхом застосовуватися для розв'язання широкого класу прикладних задач.

Перспективним напрямком є використання генетичних алгоритмів оптимізації для створення сучасних протоколів маршрутизації, які враховують як характеристики мережевих з'єднань, так і обладнання. Сформовані підходи дозволяють значно спростити (а для деяких окремих випадків є єдиним варіантом) розв'язання задачі маршрутизації у складних комп'ютерних телекомунікаційних системах.

Список літератури

1. *Hajek B., Sasaki G. Sceduling in Polynomial Time IEEE Trans. Inform. Teory. Sept. 1998. vol. 34, pp. 910-917.*
2. *. Wieselthier J. E., Barnhart C. M., Ephermides A. A Neural Networks Approach to Routing Without Interference in Multihop Networks IEEE Transactions on Comm., 1994, vol.42, no.1, pp166-1777.*
3. *Клейнрок Л. Коммуникационные сети. Стохастичекие потоки и задержки сообщений / Л. Клейнрок. – М.: Наука, 1970. – 255 с.*
4. *Колесніков К.В. Застосування нейронних мереж Хопфілда до задач адаптивної маршрутизації даних в телекомунікаціях / К.В. Колесніков, А.Р. Карапетян, О.В. Кравченко // Автоматика-2010. – Т. 2. – Х.: ХНУРЕ, 2010. – С. 168-169.*
5. *Колесніков К.В. Генетичні алгоритми для задач багатокритеріальної оптимізації в мережах адаптивної маршрутизації даних / К.В. Колесніков, А.Р. Карапетян, Т.А. Царенко // Вісник НТУ «ХПІ». – Х.: НТУ «ХПІ», 2013. – Вип. 56 (1029). – С. 44-50.*
6. *Тимофеев А.В. Проблемы и методы адаптивного управления потоками данных в телекоммуникационных системах / А.В. Тимофеев // Информатизация и связь. – 2003.– № 1, 2. – С. 68-73.*

Надійшла до редколегії 18.02.2016

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.М. Рудницький, Черкаський державний технологічний університет, Черкаси.

ЭВОЛЮЦИОННЫЕ МЕТОДЫ В ЗАДАЧАХ АДАПТИВНОЙ МАРШРУТИЗАЦИИ ДАННЫХ

А.Р. Карапетян

В статье представлены существующие методы применения моделей, построенных на основе нейронной сети и генетических алгоритмов для определения оптимального маршрута. Рассмотрена возможность использования эволюционных методов. Проанализирована вычислительная сложность при использовании функции энергии для активации нейронной сети и генетического алгоритма в сетях с адаптивной маршрутизацией.

Ключевые слова: *методы маршрутизация, адаптивная маршрутизация, многокритериальная оптимизация, нейронные сети, генетический алгоритм.*

EVOLUTIONARY METHODS IN NETWORKS WITH ADAPTIVE ROUTING OF DATA PACKETS

A.R. Karapetyan

In the article presented existing methods of application models based on neural network and genetic algorithms presented in the paper for applying. The possibility of using evolutionary methods. The computational complexity when using the activation energy for the neural network is analysed.

Keywords: *routing, neural networks, adaptive routing, genetic algorithm, the search for an optimal path in the graph.*