

## ТЕНЗОРНА МОДЕЛЬ ВІДМОВОСТІЙКОЇ QoS МАРШРУТИЗАЦІЇ В ІНФОКОМУНІКАЦІЙНІЙ МЕРЕЖІ

**Лемешко О.В., Єременко О.С.**

*Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна*

*E-mail: oleksandr.lemeshko.ua@ieee.org, oleksandra.yeremenko.ua@ieee.org*

### Tensor model of fault-tolerant QoS routing in the infocommunication network

The tensor model of fault-tolerant QoS routing has been proposed, the novelty of which is providing the required values of the average packet rate and average packet delay in the case when the multipath delay for the primary path should be no greater than the corresponding delay for the backup path. The fault-tolerant QoS routing problem has been reduced to the solution of the corresponding optimization problem of nonlinear programming.

На сьогоднішній день надзвичайно актуальною є задача, пов'язана з побудовою т.зв. відмовостійких інфокомунікаційних мереж (ІКМ), здатних забезпечити високий рівень і якості обслуговування (Quality of Service, QoS), і відмовостійкості [1, 2]. В роботі пропонується модель відмовостійкої QoS маршрутизації, в рамках якої структура мережі описується одновимірною мережею  $S = (U, V)$ , де  $U = \{u_r, r = \overline{1, m}\}$  – множина вузлів мережі (маршрутизаторів), а  $V = \{v_z = (i, j); z = \overline{1, n}; i, j = \overline{1, m}; i \neq j\}$  – множина дуг (каналів зв'язку). При цьому  $z$ -й канал моделюється дугою  $v_z = (i, j) \in V$ . Пропускна здатність  $\Phi_{i,j}$  відома для кожного каналу  $(i, j)$  і вимірюється в пакетах за секунду (1/с).

Результатом розв'язання задачі відмовостійкої QoS маршрутизації є розрахунок двох типів маршрутних змінних –  $x_{i,j}^k$  та  $\bar{x}_{i,j}^k$ , кожна з яких характеризує частку інтенсивності  $k$ -го потоку в каналі зв'язку  $(i, j)$ , що входить до основного або резервного шляху відповідно;  $K$  – множина потоків в ІКМ. Стратегія багатошляхової маршрутизації в моделі реалізується на основі обмежень  $0 \leq x_{i,j}^k \leq 1$  та  $0 \leq \bar{x}_{i,j}^k \leq 1$ , які накладаються на керуючі змінні.

Крім того, мають бути виконані умови збереження потоку на вузлах мережі, які накладаються на маршрутні змінні основного шляху [2]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{j:(i,j) \in V} x_{i,j}^k - \sum_{j:(j,i) \in V} x_{j,i}^k = 1, \quad k \in K, \quad i = s_k; \\ \sum_{j:(i,j) \in V} x_{i,j}^k - \sum_{j:(j,i) \in V} x_{j,i}^k = 0, \quad k \in K, \quad i \neq s_k, d_k; \\ \sum_{j:(i,j) \in V} x_{i,j}^k - \sum_{j:(j,i) \in V} x_{j,i}^k = -1, \quad k \in K, \quad i = d_k, \end{array} \right. \quad (1)$$

де  $s_k$  – вузол відправник, а  $d_k$  – вузол одержувач для  $k$ -го потоку. Аналогічні

умови (2) накладаються на маршрутні змінні резервного шляху.

В роботі [2] пропонується ряд умов, що відповідають за реалізацію схем захисту елементів мережі при відмовостійкій багатошляховій маршрутизації. При цьому захист каналу зв'язку ІКМ  $v_z = (i, j) \in V$  реалізується таким чином:

$$0 \leq \bar{x}_{i,j}^k \leq \delta_{i,j}^k, \text{ де } \delta_{i,j}^k = \begin{cases} 0, & \text{при захисті каналу зв'язку } (i, j) \in V; \\ 1, & \text{в іншому випадку.} \end{cases} \quad (2)$$

Також мають місце обмеження щодо запобігання перевантаження пропускної здатності каналів зв'язку (умови захисту пропускної здатності):

$$\sum_{k \in K} \lambda_{req}^k \cdot \max[x_{i,j}^k, \bar{x}_{i,j}^k] \leq \varphi_{i,j}, \quad (i, j) \in V, \quad (3)$$

де  $\lambda_{req}^k$  – середня інтенсивність  $k$ -го потоку (1/с), що надходить до мережі.

З метою забезпечення міжкінцевої QoS перейдемо до тензорної моделі ІКМ [1], в якій структура мережі визначає дискретний  $n$ -вимірний простір, де  $n$  – число каналів зв'язку в мережі. ІКМ розглядається в двох ортогональних системах координат (СК): гілок мережі  $\{v_k, k = \overline{1, n}\}$ , а також лінійно незалежних контурів  $\{\pi_i, i = \overline{1, \mu}\}$  і вузлових пар  $\{\eta_j, j = \overline{1, \phi}\}$ ,  $\mu(S) = n - m + 1$  – цикломатичне число, а  $\phi(S) = m - 1$  – ранг мережі, які визначають відповідно кількість базисних контурів і вузлових пар в мережі  $S$ . Тоді, наприклад, в разі моделювання функціонування інтерфейсу маршрутизаторів мережі СМО М/М/1 метрика простору буде представлена тензором  $G$ , координати проєкції якого в СК гілок, представлені діагональними елементами матриці  $G_v$  розміру  $n \times n$  і віднесені до кожного потоку в мережі, будуть розраховуватися так [1]:

$$g_v^{zz} = \lambda_v^z (\varphi_z - \Lambda_v^z), \quad (4)$$

де  $\lambda_v^z$  – інтенсивність аналізованого потоку в  $z$ -му каналі зв'язку при використанні наскрізної нумерації каналів;  $\Lambda_v^z$  – інтенсивність агрегованого потоку в каналі  $v_z = (i, j) \in V$ , яка згідно з виразом в лівій частині нерівності (3). Проєкції тензора  $G$  при зміні СК його розгляду перетворюються як [1]:

$$G_{\pi\eta} = A^t G_v A, \quad (5)$$

де  $G_{\pi\eta}$  – проєкція тензора  $G$  в СК контурів і вузлових пар,  $A$  –  $n \times n$  матриця коваріантного координатного перетворення [1],  $[\cdot]^t$  – оператор транспонування,  $[\cdot]^{-1}$  – оператор обернення матриці.

Як показано в [1], матрицю  $G_{\pi\eta}$  можна представити таким чином:

$$G_{\pi\eta} = \left\| \begin{array}{c|c} G_{\pi\eta}^{\langle 1 \rangle} & G_{\pi\eta}^{\langle 2 \rangle} \\ \hline G_{\pi\eta}^{\langle 3 \rangle} & G_{\pi\eta}^{\langle 4 \rangle} \end{array} \right\|, \quad G_{\pi\eta}^{\langle 4 \rangle} = \left\| \begin{array}{c|c} G_{\pi\eta}^{\langle 4,1 \rangle} & G_{\pi\eta}^{\langle 4,2 \rangle} \\ \hline G_{\pi\eta}^{\langle 4,3 \rangle} & G_{\pi\eta}^{\langle 4,4 \rangle} \end{array} \right\|,$$

де  $G_{\pi\eta}^{\langle 1 \rangle}$  и  $G_{\pi\eta}^{\langle 4 \rangle}$  – квадратні підматриці розміру  $\mu \times \mu$  і  $\phi \times \phi$  відповідно,  $G_{\pi\eta}^{\langle 2 \rangle}$  – підматриця розміру  $\mu \times \phi$ ,  $G_{\pi\eta}^{\langle 3 \rangle}$  – підматриця розміру  $\phi \times \mu$ ;  $G_{\pi\eta}^{\langle 4,1 \rangle}$  – перший елемент матриці  $G_{\pi\eta}^{\langle 4 \rangle}$ .

Тоді умови забезпечення якості обслуговування для кожного  $k$ -го потоку за вимогами щодо параметрів середньої затримки  $\tau_{req}^k$  і швидкості передачі пакетів  $\lambda_{req}^k$  приймають вид [1]:

$$\lambda_{req}^k \left( G_{\pi\eta}^{\langle 4,1 \rangle} - G_{\pi\eta}^{\langle 4,2 \rangle} \left[ G_{\pi\eta}^{\langle 4,4 \rangle} \right]^{-1} G_{\pi\eta}^{\langle 4,3 \rangle} \right)^{-1} \leq \tau_{req}^k. \quad (6)$$

В лівій частині нерівності (5) записано вираз для розрахунку міжкінцевої затримки пакетів ( $\tau_{MP}^k$ ), які передаються основним шляхом (мультишляхом). При використанні резервного шляху вираз (6) для розрахунку середньої затримки  $\bar{\tau}_{MP}^k$  за формою залишиться незмінним, проте в ньому будуть присутні компоненти матриці  $\bar{G}_{\pi\eta}$ , яка будується згідно з виразами (4) та (5) для геометричного простору, який не містить елементу (вузла, каналу) мережі, який захищається. Тоді в модель вводиться наступна умова-нерівність:

$$\tau_{MP}^k \leq \bar{\tau}_{MP}^k \leq \tau_{req}^k, \quad (7)$$

за якої середня міжкінцева багатошляхова затримка для основного шляху  $\tau_{MP}^k$  має бути не більшою за відповідну затримку для резервного шляху  $\bar{\tau}_{MP}^k$ .

В ході розв'язання задачі відмовостійкої QoS маршрутизації в ІКМ пропонується використовувати критерій оптимальності, пов'язаний з мінімізацією наступної цільової функції:

$$F = \sum_{k \in K} \sum_{E_{i,j} \in E} c_{i,j}^k x_{i,j}^k + \sum_{k \in K} \sum_{E_{i,j} \in E} \bar{c}_{i,j}^k \bar{x}_{i,j}^k, \quad (8)$$

де  $c_{i,j}^k$  і  $\bar{c}_{i,j}^k$  – маршрутні метрики каналів зв'язку, які використовуються при обчисленні основного та резервного шляхів відповідно. Таким чином, вдалося звести задачу відмовостійкої QoS маршрутизації до розв'язання оптимізаційної задачі нелінійного програмування.

### Література

1. Yeremenko, O.S. Method of Hierarchical QoS Routing Based on the Network Resource Reservation [Text] / O.S. Yeremenko, O.V. Lemeshko, O.S. Nevzorova, A.M. Nailan // 2017 IEEE First Ukraine Conference on ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING (UKRCON), 2017. – P. 971–976.
2. Лемешко, О.В. Розробка та дослідження лінійної оптимізаційної моделі швидкої перемаршрутизації з балансуванням навантаження в телекомунікаційних мережах [Текст] / О.В. Лемешко, О.С. Єременко // Радиоелектроника и информатика. – 2017. – № 4 (79). – С. 18–25.