

К. Обельовська, Р. Панчишин, О. Ліскевич
Національний університет “Львівська політехніка”
кафедра автоматизованих систем управління

МАРШРУТИЗАЦІЯ ПАКЕТІВ ДЛЯ АВТОНОМНИХ СИСТЕМ ІНТЕРНЕТУ З ВРАХУВАННЯМ ТРЬОХ КРИТЕРІЇВ

© Обельовська К., Панчишин Р., Ліскевич О., 2017

Запропоновано метод вибору шляхів для маршрутизації пакетів в автономних системах, що дає змогу вибирати шлях передавання пакетів з врахуванням впливу трьох критеріїв. Шлях вибрано мінімізацією сумарного відносного відхилення.

Ключові слова: комп'ютерні мережі, автономні системи, маршрутизація, протокол OSPF, маршрутні таблиці.

The method of packets route selection in autonomous systems within internet is proposed. The method takes into account the impact of the three criteria to select the route. Route selection is made based on the minimization of total relative deviation by three criteria.

Key words: computer network, autonomous system routing protocol OSPF, route table.

Постановка проблеми

Для вибору маршруту від відправника даних до одержувача в мережі Internet поширені спеціальні протоколи – так звані протоколи маршрутизації. Маршрутизація – це один з основних факторів ефективності функціонування комп'ютерних мереж. Передавання великих масивів даних, аудіо- і відеозв'язок, обмін короткими повідомленнями, сигналізація, передавання управляючих команд – все це висуває свої вимоги щодо якості передавання даних. Вдале вирішення завдання маршрутизації може гарантувати потрібну якість обслуговування.

Одним з найпопулярніших протоколів маршрутизації в межах автономної системи є протокол OSPF (Open Shortest Path First) [1], описаний у стандарті RFC 2328. Для визначення найкоротшого маршруту у цьому протоколі використано алгоритм Дейкстри, за яким розглядають кожен маршрутизатор як корінь дерева і на основі вартості шляху визначають найкоротші за сукупною вартістю шляхи від нього до кожного вузла призначення.

Як вартість шляху можна використовувати різні параметри, наприклад, пропускну здатність, кількість проміжних вузлів, затримку у вузлі, затримку в лінії зв'язку, надійність, вартість. За замовчуванням у протоколі OSPF використано метрику, що ґрунтується на пропускій здатності каналів зв'язку. Що вища пропускну здатність каналу, то нижча вартість шляху, а отже, шлях з мінімальною вартістю забезпечуватиме максимальну пропускну здатність.

На основі дерева найкоротших шляхів, знайдених за алгоритмом Дейкстри, кожен маршрутизатор будує свою таблицю маршрутизації. Основним недоліком такого підходу є врахування для визначення шляху лише одного параметра. Це означає, що для інших критеріїв знайдений шлях може бути не оптимальним.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

З часом до протоколів маршрутизації висувають все вищі вимоги. Порівняльний аналіз ефективності протоколів динамічної маршрутизації наведено в роботі [2], існують роботи з їх вдосконалення, зокрема, в [3] пропонується алгоритм Дейкстри з покращеною робастністю для управління маршрутизацією в IP-мережах. В [4] для вдосконалення маршрутизації запропоновано компроміс між однокроковою маршрутизацією і маршрутизацією з резервуванням повного шляху. Весь шлях ділять на окремі відрізки, які будуть резервуватися по черзі, а кожен наступний відрізок

вибирають незалежно за принципом однокрокової маршрутизації. Крім того, в [4] рекомендовано для потоку даних аналізувати декілька можливих шляхів. У [5] при виборі маршрутів враховують два критерії: пропускну здатність каналів та кількість проміжних вузлів.

Формування цілі статті

Запропоновано під час вибору маршруту орієнтуватись на три параметри для знаходження дерева найкоротших шляхів. Наприклад, для критичних щодо часу застосувань можна крім запропонованих у [5] двох критеріїв (пропускну спроможність та кількість проміжних вузлів) рекомендувати враховувати ще часові затримки в лініях зв'язку, оскільки різні фізичні середовища мають значні відмінності в часі розповсюдження сигналів. Так, наприклад, в оптоволоконних Fujikuga це значення дорівнює 0,4867 мкс/100 км, для низькоорбітального супутникового зв'язку становить 6,6731 мкс/100 км, а для геостаціонарного – 240,2322 мкс/100 км [6].

Основна частина

За алгоритмом Дейкстри знаходимо дерева найкоротших шляхів окремо для кожної з трьох метрик. Для кожного дерева знаходимо ваги шляхів за метрикою, для якої проводилась оптимізація, та двома іншими метриками. Записи маршрутної таблиці пропонується формувати, мінімізуючи сумарне відносне відхилення знайдених ваг від їхніх оптимальних значень.

Побудова маршрутних таблиць за комбінованою метрикою, що ґрунтується на трьох критеріях

Вхідними даними для побудови маршрутних таблиць за комбінованою метрикою, що ґрунтується на трьох критеріях, є: топологія мережі, критерії, за якими здійснюватиметься оптимізація, та ваги каналів за метриками, що відповідають критеріям оптимізації. Критеріями оптимізації, наприклад, можуть бути пропускну здатність каналів C , кількість проміжних маршрутизаторів на шляху до віддаленого вузла N та час затримки сигналів у фізичних середовищах передавання Z , який, своєю чергою, залежить від фізичної довжини лінії зв'язку і часу розповсюдження сигналу фізичним середовищем цього типу.

Для загального випадку позначимо через $M1$, $M2$, $M3$ три критерії оптимізації, за якими будуть знаходитись дерева найкоротших шляхів. У нашому прикладі це відповідно будуть наведені вище параметри C , N , Z .

Проілюструємо запропонований підхід на прикладі мережі, зображеної на рис. 1.

За алгоритмом Дейкстри для наведеної мережі сформуємо для вузла 1 таблицю шляхів за критерієм $M1$, що враховує пропускну здатності каналів зв'язку C .

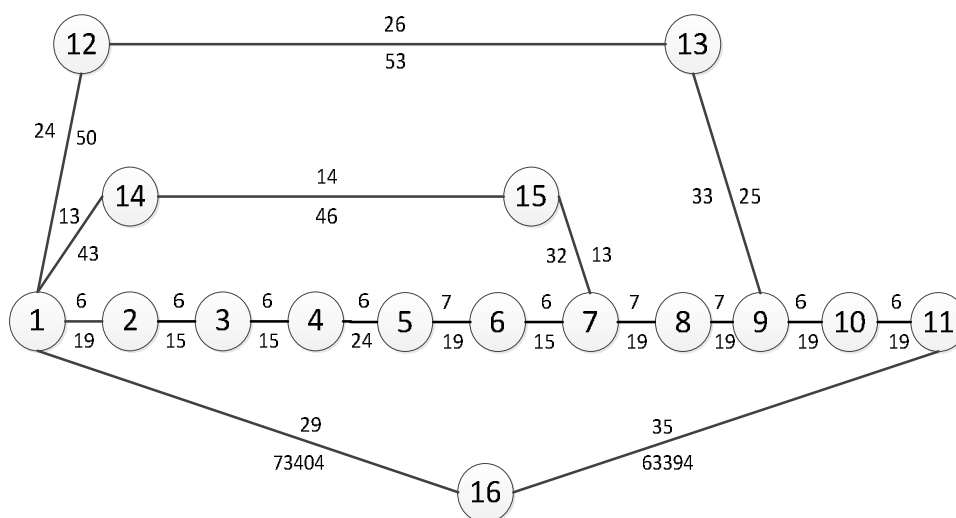


Рис. 1. Граф мережі, ваги каналів якої враховують критерій $M1$ (значення над ребрами) та $M3$ (значення під ребрами)

DN	Path	M1->C	N	Z
1	1	0	0	0
2	1 2	6	1	19
3	1 2 3	12	2	34
4	1 2 3 4	18	3	49
5	1 2 3 4 5	24	4	73
6	1 2 3 4 5 6	31	5	92
7	1 2 3 4 5 6 7	37	6	107
8	1 2 3 4 5 6 7 8	44	7	126
9	1 2 3 4 5 6 7 8 9	51	8	145
10	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	57	9	164
11	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11	63	10	183
12	1 12	24	1	50
13	1 12 13	50	2	103
14	1 14	13	1	43
15	1 14 15	27	2	89
16	1 16	29	1	73404

Рис. 2. Таблиця шляхів від вузла 1 до всіх інших вузлів, знайдена за метрикою M1

У таблиці шляхів з рис. 2: DN (Destination Node) – номер віддаленого вузла, M1 -> C – вага сукупного шляху, оптимізованого за метрикою M1, що базується на пропускній здатності каналів; N – кількість переходів (хопів) на шляху до віддаленого вузла; Z – сукупна затримка в усіх фізичних середовищах на шляху до віддаленого вузла.

Сформуємо для мережі, наведеної на рис. 1, таблицю шляхів від вузла 1 згідно з метрикою M2, в якій буде мінімізовано кількість хопів на шляху між взаємодіючими вузлами. Оскільки оптимізація здійснюється за критерієм мінімальної кількості проміжних вузлів (метрика M2), то ваги каналів, пов'язані з пропускними здатностями каналів, у цьому випадку не беруть участі в роботі алгоритму Дейкстри. Прийнемо, що вага кожного каналу дорівнює одиниці. В результаті отримаємо таблицю шляхів (рис. 3):

DN	Path	C	M2->N	Z
1	1	0	0	0
2	1 2	6	1	19
3	1 2 3	12	2	34
4	1 2 3 4	18	3	49
5	1 2 3 4 5	24	4	73
6	1 14 15 7 6	46	4	136
7	1 14 15 7	40	3	121
8	1 12 13 9 8	82	4	155
9	1 12 13 9	75	3	136
10	1 16 11 10	70	3	136817
11	1 16 11	64	2	136798
12	1 12	24	1	50
13	1 12 13	50	2	103
14	1 14	13	1	43
15	1 14 15	27	2	89
16	1 16	29	1	73404

Рис. 3. Таблиця шляхів, знайдена за метрикою M2, від вузла 1 до всіх інших вузлів

Аналогічну таблицю шляхів, оптимізовану за критерієм M3 (мінімальної затримки), наведено на рис. 4.

DN	Path	C	N	M3->Z
1	1	0	0	0
2	1 2	6	1	19
3	1 2 3	12	2	34
4	1 2 3 4	18	3	49
5	1 2 3 4 5	24	4	73
6	1 2 3 4 5 6	31	5	92
7	1 2 3 4 5 6 7	37	6	107
8	1 2 3 4 5 6 7 8	44	7	126
9	1 12 13 9	75	3	136
10	1 12 13 9 10	81	4	155
11	1 12 13 9 10 11	87	5	174
12	1 12	24	1	50
13	1 12 13	50	2	103
14	1 14	13	1	43
15	1 14 15	27	2	89
16	1 12 13 9 10 11 16	122	6	63568

Рис. 4. Таблиця шляхів, знайдена за метрикою M3, від вузла 1 до всіх інших вузлів

Позначимо:

- $C1$ – вага сукупного шляху, знайденого за критерієм $M1$ і обчисленого за метрикою, що відповідає критерію $M1$;
- $N1$ – вага сукупного шляху, знайденого за критерієм $M1$ і обчисленого за метрикою, що відповідає критерію $M2$;
- $Z1$ – вага сукупного шляху, знайденого за критерієм $M1$ і обчисленого за метрикою, що відповідає критерію $M3$.

Тоді $C2, N2, Z2$ – ваги сукупних шляхів, знайдених за критерієм $M2$ і обчислених відповідно за метриками, що відповідають критерію $M1, M2, M3$, а $C3, N3, Z3$ – ваги сукупних шляхів, знайдених за критерієм $M3$ і обчислених відповідно за метриками, що відповідають критерію $M1, M2, M3$.

Для прикладу розглянемо вибір шляху між кореневим вузлом 1 та вузлом 11.

Оптимальним шляхом між вузлами 1 та 11, знайденим за критерієм $M1$, буде шлях
1-2-3-4-5-6-7-8-9-10-11.

Для нього $C1 = 63, N1 = 10, Z1 = 183$, де $C1$ – вага сукупного шляху, отриманого за метрикою критерію $M1$, що в цьому випадку був критерієм оптимізації; $N1$ – кількість переходів (хопів) на шляху до віддаленого вузла; $Z1$ – вага сукупного шляху за метрикою критерію $M3$.

Для формування маршрутних таблиць потрібно знати IP-адреси інтерфейсів маршрутизаторів. Присвоїмо деяким інтерфейсам маршрутизаторів, що будуть використані в подальшому прикладі, певні IP-адреси. Наприклад, присвоємо IP-адресу 20.0.0.1 інтерфейсу маршрутизатора 1, через який пакети будуть передаватись на маршрутизатор 12. Інші присвоєння показано в табл. 1.

У маршрутній таблиці вузла 1, що використовуватиме дерево шляхів, знайдене за метрикою 1, для наведеного прикладу (шляху від вузла 1 до вузла 11) буде введено запис (табл. 2).

Таблиця 1

Відповідності IP-адрес деяким інтерфейсам вузлів мережі

1-12	20.0.0.1	12-1	20.0.0.2	11-10	100.0.0.1
1-14	30.0.0.1	14-1	30.0.0.2	1-16	50.0.0.1
1-2	40.0.0.1	2-1	40.0.0.2	16-1	50.0.0.2

Таблиця 2

Фрагмент маршрутної таблиці вузла 1, побудованої за метрикою 1

Destination	Gateway	Interface	Metrica
100.0.0.0	40.0.0.2	40.0.0.1	63

У цій таблиці: Destination node – IP адреса вузла призначення; Gateway – IP адреса наступного вузла; Interface – IP адреса порту вузла 1, на який буде відправлено пакет; Metrica – вага шляху від поточного вузла до вузла призначення, знайденого за критерієм $M1$.

Сформуємо для мережі, наведеної на рис. 1, таблицю шляхів для вузла 1 згідно з критерієм $M2$. В нашому прикладі оптимізація буде здійснюватись за критерієм мінімальної кількості проміжних вузлів.

Позначимо:

- $C2$ – вага сукупного шляху, знайденого за критерієм $M2$ і обчисленого за метрикою, що відповідає критерію $M1$;

- $N2$ – вага сукупного шляху, знайденого за критерієм $M2$ і обчисленого за метрикою, що відповідає критерію $M2$;

- $Z2$ – вага сукупного шляху, знайденого за критерієм $M2$ і обчисленого за метрикою, що відповідає критерію $M3$.

Оптимальним шляхом між вузлами 1 та 11 буде шлях
1-16-11.

Для нього $C2 = 64$, $N2 = 2$, $Z2 = 136798$.

У маршрутній таблиці вузла 1, що використовуватиме дерево шляхів, знайдене за метрикою 2, для наведеного прикладу буде введено інший запис (табл. 3):

Таблиця 3

Фрагмент маршрутної таблиці вузла 1, побудованої за метрикою 2

Destination node	Gateway	Interface	Metrica
100.0.0.0	50.0.0.2	50.0.0.1	2

Аналогічно сформуємо для мережі, наведеної на рис. 1, таблицю шляхів згідно з метрикою 3. Відповідно позначимо:

- $C3$ – вага сукупного шляху, знайденого за критерієм $M3$ і обчисленого за метрикою, що відповідає критерію $M1$;

- $N3$ – вага сукупного шляху, знайденого за критерієм $M3$ і обчисленого за метрикою, що відповідає критерію $M2$;

- $Z1$ – вага сукупного шляху, знайденого за критерієм $M3$ і обчисленого за метрикою, що відповідає критерію $M3$.

Використовуючи метрику 3, отримаємо ще один варіант шляху від вузла 1 до вузла 11. Це шлях 1-12-13-9-10-11, що має 4 проміжні вузли на шляху, вагу сукупного шляху C , що дорівнює 87, та затримку в 174 мкс. Для нього $C3 = 87$, $N3 = 5$, $Z3 = 174$.

У табл. 4 наведено фрагмент маршрутної таблиці вузла 1, побудованої за метрикою 3.

Оскільки шляхи, отримані за різними критеріями, виявились різними, то відрізняються і записи в маршрутних таблицях.

**Фрагмент маршрутної таблиці вузла 1,
побудованої за метрикою 3**

Destination node	Gateway	Interface	Metrica
100.0.0.0	20.0.0.2	20.0.0.1	174

Для аналізу ефективності шляхів за критеріями, відмінними від критерію оптимізації, введемо поняття базового маршруту. Базовий маршрут – це маршрут, сумарна вага якого обчислюється за тією самою метрикою, для якої здійснювалась оптимізація. Вводимо поняття коефіцієнта відхилення, який показує, у скільки разів вага сукупного шляху, оптимізованого за іншим критерієм, є більшою від ваги базового шляху. Якщо в загальному випадку позначити коефіцієнт відхилення через k_{ij} , то k_{ij} – це відношення загальної ваги шляху, оптимізованого за метрикою MI та обчисленої за метрикою MJ до загальної ваги шляху, оптимізованого за метрикою MJ та обчисленої за метрикою MJ . Для прикладу, що розглядається:

$$k_{21} = C2 / C1, k_{31} = C3 / C1; \quad (1)$$

$$k_{12} = N1 / N2, k_{32} = N3 / N2; \quad (2)$$

$$k_{13} = Z1 / Z3, k_{23} = Z2 / Z3. \quad (3)$$

Введемо поняття сумарного відносного відхилення S ваг двох не базових маршрутів від ваги базового оптимального маршруту. Всі ваги для обчислення сумарного відносного відхилення обчислюються за метрикою оптимізації. Тобто SI – це сумарне відносне відхилення ваг двох не базових маршрутів від базового оптимального маршруту, знайденого за метрикою MI , а $S1$ – це сумарне відносне відхилення ваг маршрутів, знайдених відповідно за критеріями $M2$ та $M3$ та обчисленого за критерієм $M1$ до ваги маршруту, знайденого та обчисленого за метрикою MI . Для таких позначень:

$$S1 = k_{21} + k_{31}, \quad (4)$$

$$S2 = k_{12} + k_{32}, \quad (5)$$

$$S3 = k_{13} + k_{23}. \quad (6)$$

Знаходимо мінімальне значення SJ . Значення J і є номером метрики, яку необхідно використати для знаходження оптимального шляху для формування відповідного запису результуючої маршрутної таблиці.

У нашому прикладі мінімальним є $S3$, а отже, шляхом, що буде вписаним у маршрутну таблицю, буде шлях 1-12-13-9-10-11, і йому відповідатиме такий запис у табл. 5.

**Фрагмент маршрутної таблиці вузла 1, побудованої
за мінімізацією сумарного відносного відхилення**

Destination node	Gateway	Interface	Metrica
100.0.0.0	20.0.0.2	20.0.0.1	174

Цей шлях оптимізовано за сумарним мінімальним відносним відхиленням трьох шляхів, оптимізованих за трьома різними критеріями.

Зведену результуючу таблицю усіх шляхів, оптимізовану за критерієм сумарного відносного відхилення, наведено на рис. 5.

Будуючи таблицю, до уваги брали три критерії (пропускна здатність, кількість хопів та затримка у фізичному середовищі), таблицю оптимізовано за критерієм сумарного відносного відхилення як основу для формування записів маршрутної таблиці маршрутизатора.

DN	Path	C	N	Z
1	1	0	0	0
2	1 2	6	1	19
3	1 2 3	12	2	34
4	1 2 3 4	18	3	49
5	1 2 3 4 5	24	4	73
6	1 2 3 4 5 6	31	5	92
7	1 2 3 4 5 6 7	37	6	107
8	1 2 3 4 5 6 7 8	44	7	126
9	1 12 13 9	75	3	136
10	1 12 13 9 10	81	4	155
11	1 12 13 9 10 11	87	5	174
12	1 12	24	1	50
13	1 12 13	50	2	103
14	1 14	13	1	43
15	1 14 15	27	2	89
16	1 16	29	1	73404

Рис. 5. Таблиця шляхів вузла 1, знайдена за критерієм мінімального сумарного відхилення

Висновок

Запропоновано та розроблено метод, за яким можна вибрати шлях передавання пакетів, враховуючи вплив трьох критеріїв мінімізацією сумарного відносного відхилення. Передбачалось, що важливість кожного критерію є однаковою. Подальшим напрямком досліджень може бути врахування різних вимог до різних критеріїв, чого можна досягти формуванням сумарного відносного відхилення з наданням різним критеріям різних ваг.

1. *OSPF Design Guide*. – [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.cisco.com/c/en/us/support/docs/ip/open-shortest-path-first-ospf/7039-1.html#t6>.
2. Golap Kanti Dey, Md. Mobasher Ahmed. *Performance Analysis and Redistribution among RIPv2, EIGRP & OSPF Routing Protocol. Conference Paper: 1st International Conference on Computer & Information Engineering (ICCIE 2015) at Rajshahi University of Engineering & Technology (RUET), Rajshahi, Bangladesh, 2015*.
3. Кузнецов Н. А., Фетисов В. Н. Алгоритм Дейкстры с улучшенной робастностью для управления маршрутизацией в IP-сетях // *Автоматика и телемеханика*. – 2008. – № 2. – С. 80–85.
4. Быков Д. В., Лукьянов В. С. Разработка внутреннего протокола маршрутизации // *Информационные технологии моделирования и управления*. – 2007. – N 1 (35). – С. 10–105.
5. Обельовська К., Роман В., Ліскевич О. Маршрутизація пакетів з врахуванням пропускних здатностей каналів та кількості проміжних вузлів // *Вісник Нац. ун-ту “Львівська політехніка” Комп’ютерні науки та інформаційні технології*. – 2014. – № 800. – С. 78–82.
6. Салифов И. И. Расчет и сравнение сред передачи современных магистральных сетей связи по критерию латентности (задержки) // *журнал T-Comm № 4*. – 2009. – С. 42–45.

Робота виконана у рамках спільного українсько-австрійського науково-дослідного проекту 014U001612 “Моделювання трафіку та телекомунікаційних мереж”.