УДК 681.3

DOI: 10.18372/2073-4751.75.18016

Кулаков Ю.О., д.т.н.,
orcid.org/0000-0002-8981-5649,
Грабовенко Ю.В.,
Кузьмич Р.О.

СПОСІБ МАРШРУТИЗАЦІЇ В МОБІЛЬНИХ ПРОГРАМНО-КОНФІГУРОВАНИХ МЕРЕЖАХ НА ОСНОВІ СИСТЕМИ НЕЧІТКОГО ВИВОДУ

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

ya.kulakov@gmail.com

Вступ

Швидке встановлення мереж *MANET*, що не потребує попередньої інфраструктури, та здатність вузлів динамічно організовуватись і конфігуруватись без допомоги адміністратора робить цей тип мереж надзвичайно популярними та більш підходящими за інші рішення. Однак, обмежені ресурси та рухливість мобільних вузлів призводить до частої зміни топології та відмов у маршрутизації. Це створює необхідність в адаптації стратегій маршрутизації для енергозбереження та продовження тривалості функціонування мережі.

Багато протоколів маршрутизації *MANET* використовують одну метрику, наприклад, кількість хопів, сигнал або енергія вузла, для побудови маршруту [1]. Втім, цей підхід недостатній для визначення стабільного маршруту і може спричиняти збої маршрутизації, що вимагає пошуку нового маршруту при руйнуванні поточного [2]. Операції відновлення маршруту вимагають додаткових ресурсів і погіршують продуктивність роботи мережі. Використання одношляхових протоколів маршрутизації теж збільшує операції виявлення маршрутів при руйнуванні зв'язків в мережах *MANET* через динамічність вузлів, що призводить до частої зміни топології [3].

Для покращення вибору маршруту в мобільній мережі доцільно використати систему нечіткого виводу, на основі якої вдасться врахувати множину метрик при визначенні маршруту та таким чином усунути недоліки протоколів маршрутизації на основі однієї метрики, таких як *AODV* чи *MBCR*. Це забезпечить точніший вибір маршруту та зменшить рівень відмов, сприяючи покращенню продуктивності мережі. Використання системи нечіткого виводу також дозволить спрогнозувати кращий шлях для передачі пакетів в умовах частої зміни параметрів конфігурації мережі, що є характерним для мобільних мереж *MANET*, та забезпечити її надійну та ефективну роботу.

Технологія *SDN* використовується для розв'язання проблем архітектури мережі. Використання протоколу *OpenFlow* дозволяє відокремити площину управління від плошини передачі даних, тим самим полегшуючи контроль трафіку. Застосування технології *SDN* дозволяє без обмежень змінювати обладнання та застосунки мережі. Цей тип мережі можна швидко налаштувати, оновити або розширити за потребою [4,5]. Наявність *SDN* контролера в мобільній мережі уможливлює централізоване управління розподіленою мережею та покращує її ефективність роботи.

Постановка задачі

Завдання полягає в розробці способу маршрутизації для мобільних програмно-конфігурованих мереж із застосуванням системи нечіткого виводу та багатошляхової маршрутизації. Даний спосіб дозволить прогнозувати рівень стабільності шляхів на основі множини вхідних метрик та вибрати маршрут із найменшою

ймовірністю руйнування зв'язків для передачі даних. Також використання алгоритму багатошляхової маршрутизації дасть можливість здійснити процес динамічної реконфігурації основного шляху з метою обходу критичної ділянки в процесі маршрутизації. Для реалізації даного способу маршрутизації буде розроблено програмний додаток, який дозволить будувати граф мобільної мережі та проводити моделювання запропонованого способу із виводом результатів його виконання.

Мета

Метою даної роботи є продовження тривалості існування маршруту та зменшення споживання ресурсів в мобільній програмно-конфігурованій мережі за допомогою застосування системи нечіткого виводу та багатошляхової маршрутизації.

Для досягнення основної мети необхідно вирішити наступні завдання:

1. Здійснити огляд існуючих способів маршрутизації в мобільних мережах;
2. Описати модель запропонованого способу маршрутизації з використанням багатошляхової маршрутизації, системи нечіткого виводу та технології *SDN* в мобільних мережах;
3. Розробити програмне забезпечення для моделювання роботи запропонованого способу.

Основна частина

На рис. 1 зображено структуру контролера *SDN* на основі вбудованої системи нечіткого виводу методу Мамдані, на основі якої обраховуються значення відсотку стабільності маршрутів з врахуванням метрик кількості хопів, середньої залишкової енергії вузлів та їх середньої швидкості руху на шляху. У результаті виконання заданого способу маршрут із найвищим рівнем стабільності буде обрано для передачі пакетів в контролері *SDN*.

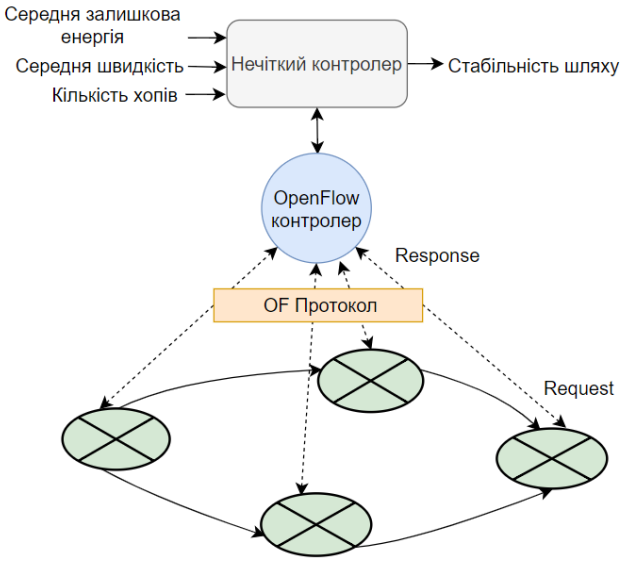

Рис. 1. Структура нечіткого *SDN* контролера

Запропонований спосіб реалізується в наступні етапи:

- Знаходження маршрутів з використанням багатошляхового алгоритму оберненої хвилі;
- Визначення відсотку стабільності маршрутів з використанням системи нечіткого виводу;
- Обрати шлях із найвищим рівнем стабільності для проведення маршрутизації.

У роботі пропонується використати метрику середньої залишкової енергії вузлів маршруту, що розраховується наступним чином:

$$E_{average} = \frac{\sum_{i=1}^{k} E_i}{k},$$

де $E_{average}$ – середня залишкова енергія вузлів маршруту; E_i – залишкова енергія

окремого вузла шляху, що є різницею між початковою та спожитою енергією, яка була витрачена на передачу та одержання пакетів; k – сумарна кількість вузлів маршруту.

Врахування даної метрики дозволить визначити маршрут, який містить вузли із достатнім рівнем енергії для передачі пакетів до вузла призначення протягом певного відрізку часу. Це допомагає продовжити термін служби батареї пристроїв і покращити ефективність роботи мережі.

Для визначення маршруту, що містить найменш мобільні вузли пропонується використати метрику середньої швидкості вузлів маршруту, що обчислюється за наступною формулою:

$$S_{average} = \frac{\sum_{i=1}^{k} S_i}{k},$$

де $S_{average}$ – середня швидкість руху вузлів маршруту; S_i – швидкість руху кожного вузла маршруту; k – загальна кількість вузлів маршруту.

З метою мінімізації ймовірності втрати пакетів через значну кількість затримок при передачі пропонується врахувати метрику кількості хопів, яка визначається як:

$$H_T = \sum_{i=1}^{k} h_i,$$

де H_T – сумарна кількість хопів маршруту; h_i – перехід між двома вузлами маршруту.

Алгоритм багатошляхової маршрутизації оберненої хвилі, використаний на етапі виявлення маршрутів складається з таких етапів:

1. Визначення множина вузлів, що суміжні до кінцевого вузла.

2. Створення таблиці маршрутів для кожного вузла із отриманої множини, в які заноситься інформація про залишкову енергію та швидкість вузлів у напрямку до вузла призначення.

3. Визначення множини вузлів, суміжних до попередньої множини вузлів, що не було попередньо розглянуто, та створення таблиць маршрутів для кожної вершини із цієї множини.

4. Повторення третього етапу до формування таблиць маршрутів для кожного вузла в графі.

У процесі виконання заданого алгоритму для кожного вузла заносяться дані про метрики залишкової енергії та швидкості суміжних вузлів до таблиці маршрутів, приклад якої наведено у табл. 1. У результаті виконання даного алгоритму у контролері *SDN* отримується множина непересічних маршрутів із значеннями запропонованих метрик маршрутів.

Для прогнозування рівня стабільності маршрутів використовується система нечіткого виводу типу Мамдані, структуру якої зображено на рис. 2.

Таблиця 1.

Адресат	Суміжний вузол	Метрика швидкості	Залишкова енергія
Rn	*Ri*	*Si,n*	E*i,n*

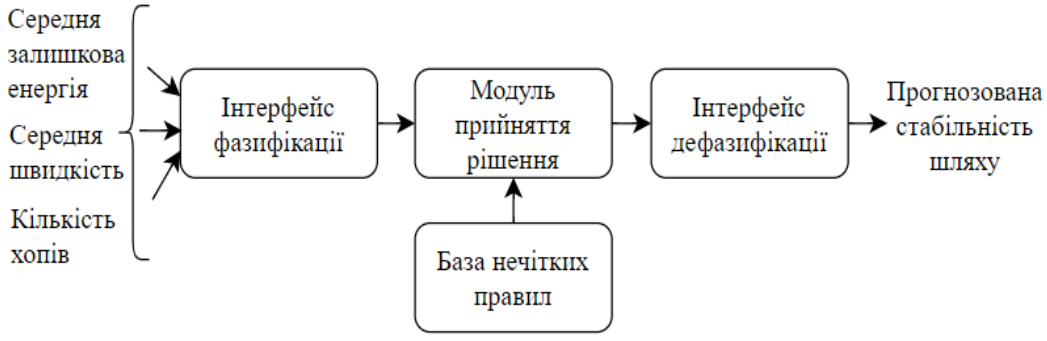

Рис. 2. Запропонована модель системи нечіткого виводу

Алгоритм визначення стабільності маршруту на основі системи нечіткого виводу складається із наступних етапів:

1. Для шляху $p \in P_m$, де $1<p<n$, m – кількість шляхів

2. Привести до нечіткого виду вхідні значення залишкової енергії E_m, швидкості S_m та кількості хопів H_m m-го шляху з використанням трикутної функції приналежності:

$$\mu_A(x) = triangular(a,b,c) = \begin{cases} 0, x \le a \\ (x-a)/(b-a), a \le x \le b \\ (c-x)/(c-b), b \le x \le c \\ 0, c \le x \end{cases}.$$

3. Розрахувати функції приналежності кожної метрики шляху, використовуючи функцію Мамдані.

4. Обчислити степінь приналежності вхідних значень до нечітких множин.

5. За допомогою бази нечітких правил та параметрів обрахувати нечітке значення стабільності шляху R_m.

6. Дефазифікувати нечітке вихідне значення та отримати числове значення стабільності шляху.

На етапі фазифікації для кожного вхідного значення метрики встановлюється ступінь приналежності до кожного нечіткого набору, для цього використовуються трикутні функції приналежності. Приклад функції приналежності для лінгвістичної змінної залишкової енергії показано на рис. 3, де для позначення термів змінної використано наступні умовні позначення: *L* – "Низька", *M* – "Середня", *H* – "Висока".

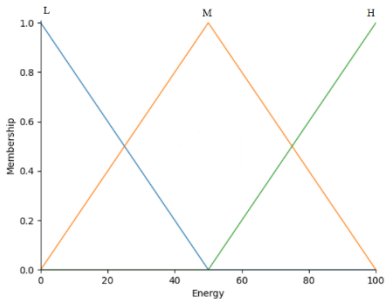

Рис. 3. Функція приналежності вхідної змінної залишкової енергії

У модулі прийняття рішення використовується база нечітких правил *IF-THEN*, за допомогою яких вхідні функції приналежності відображаються у вихідні. Оскільки максимальна кількість правил в базі визначається як добуток ($a \times b \times c$), де a, b і c – кількість функцій приналежності вхідних лінгвістичних змінних, запропонована система містить 27 правил, які наведено у табл. 2. Для опису зв'язків між вхідними та вихідними значеннями змінних використано оператор мінімуму *AND*. Правила у запропонованій системі виводу представляються за допомогою наступної рівності: Правило (i): *IF* x_1 *is* C_1^i *AND* x_2 *is* C_2^i *AND* x_3 *is* C_3^i *THEN* z_1 *is* D_1^i, де i – порядковий номер правила в базі правил; x_1, x_2, x_3 – чіткі вхідні значення; z_1 – чітке вихідне значення; C_1^i, C_2^i, C_3^i – нечіткі множини вхідних значень; D_1^i – нечітка вихідна множина.

На етапі дефазифікації для обчислення чіткого вихідного значення на основі агрегованого нечіткого виводу використовується центроїдний метод, що описується формулою:

$$z = \frac{\int \mu_C(x) \cdot x dx}{\int \mu_C(x) dx}$$

де z – вихідне чітке значення; x – центроїд вихідної функції приналежності; $\mu_C(x)$ – значення ваги для вихідної функції приналежності.

Графічна інтерпретація центроїдного методу дефазифікації зображено на рис. 4.

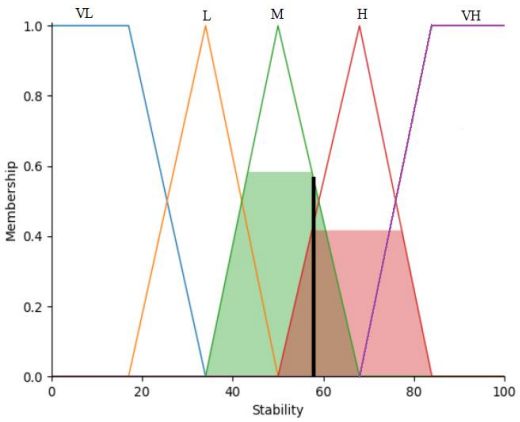

Рис. 4. Обчислення чіткого значення вихідної змінної стабільності

Таблиця 2.

№	Залишкова енергія	Кількість хопів	Швидкість	Стабільність
1	Висока	Довга	Висока	Дуже низька
2	Висока	Середня	Висока	Дуже низька
3	Висока	Коротка	Висока	Низька
4	Висока	Довга	Середня	Низька
5	Висока	Середня	Середня	Середня
6	Висока	Коротка	Середня	Дуже Висока
7	Висока	Довга	Низька	Середня
8	Висока	Середня	Низька	Висока
9	Висока	Коротка	Низька	Дуже висока
10	Середня	Довга	Висока	Дуже низька
11	Середня	Середня	Висока	Низька
12	Середня	Коротка	Висока	Низька
13	Середня	Довга	Середня	Низька
14	Середня	Середня	Середня	Середня
15	Середня	Коротка	Середня	Висока
16	Середня	Довга	Низька	Середня
17	Середня	Середня	Низька	Висока
18	Середня	Коротка	Низька	Висока
19	Низька	Довга	Висока	Дуже низька
20	Низька	Середня	Висока	Дуже низька
21	Низька	Коротка	Висока	Низька
22	Низька	Довга	Середня	Дуже низька
23	Низька	Середня	Середня	Дуже низька
24	Низька	Коротка	Середня	Низька
25	Низька	Довга	Низька	Дуже низька
26	Низька	Середня	Низька	Низька
27	Низька	Коротка	Низька	Низька

На рис. 5 зображено результати моделювання запропонованого способу у розробленій програмі для графу із 20 вузлів та щільністю 0,26 для пошуку маршруту із найвищим рівнем стабільності між вузлами *S*1 та *S*20. На панелі виводу показано три непересічні шляхи із розрахованими значеннями метрик та прогнозованим рівнем стабільності маршруту. У даному випадку для проведення маршрутизації буде використано шлях *S*1 → *S*9 → *S*16→ *S*15→ *S*20. Якщо рівень стабільності основного шляху зменшиться, то один із двох альтернативних маршрутів із вищими показниками надійності буде використано для передачі пакетів, що зменшує кількість операцій виявлення маршрутів від початкової вершини. Також перевагою даного способу є можливість здійснення процесу динамічної ремаршрутизації основного шляху через застосування багатошляхового алгоритму маршрутизації, в результаті чого *SDN* контролер здійснює передачу даних до вузла, що є найближчим до вузла з яким було втрачено зв'язок. Це допомагає уникнути процесу виявлення маршруту від початкового вузла та оптимізувати використання ресурсів мережі.

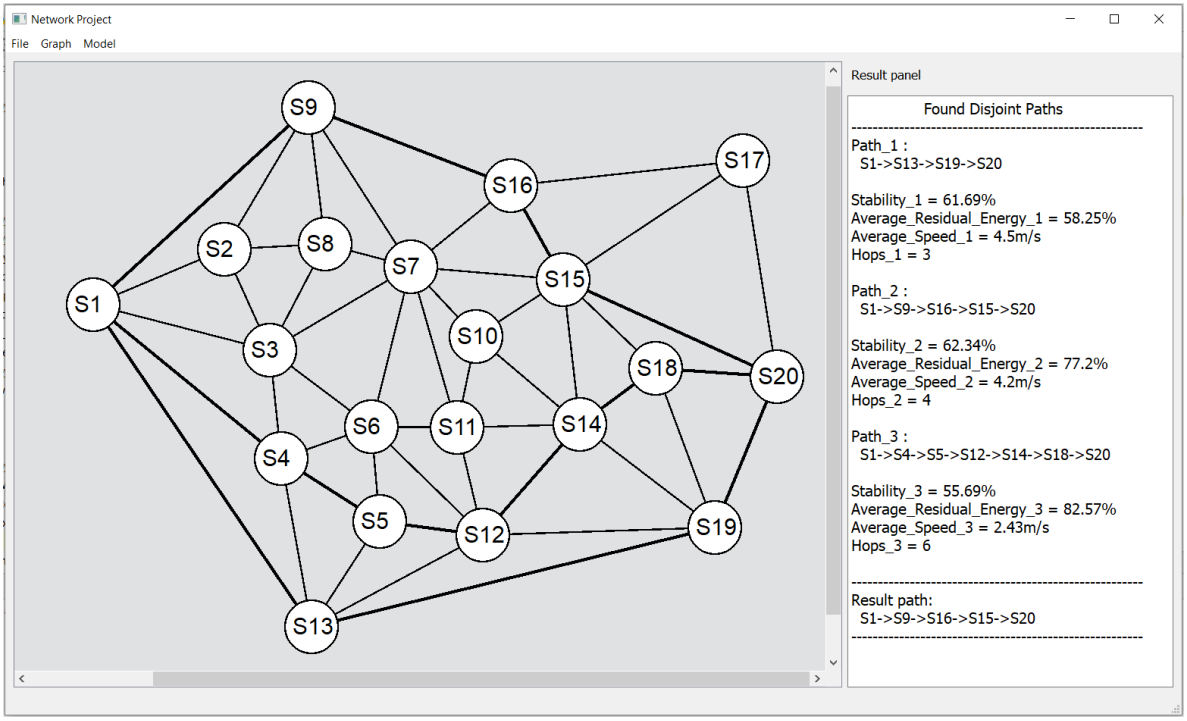

Рис. 5. Результати моделювання способу маршрутизації в розробленій програмі

Висновки

На основі огляду існуючих рішень виявлено недостатню ефективність застосування одношляхових протоколів маршрутизації та протоколів маршрутизації на основі однієї метрики в умовах частої зміни конфігурації мобільної мережі, що спричинено динамічністю та обмеженістю енергетичних ресурсів мережі. Для прогнозування маршруту, який може забезпечити успішну передачу даних до вузла призначення протягом певного проміжку часу, розроблено спосіб маршрутизації з використанням засобів нечіткої логіки, технології *SDN* та багатошляхової маршрутизації. За допомогою застосування системи нечіткого виводу враховується множина заданих метрик маршруту для визначення рівня стабільності шляхів. Значною перевагою запропонованого способу маршрутизації є можливість здійснення процесу динамічної реконфігурації основного маршруту через руйнування зв'язку в процесі маршрутизації, що допомагає оптимізувати використання ресурсів мережі.

Література

1. Venkatasubramanian S., Suhasini A., Vennila C. QoS Provisioning in MANET Using Fuzzy-Based Multifactor Multipath Routing Metric. *Sustainable Communication Networks and Application: Proceedings of ICSCN 2021* / Singapore, 2022. P. 555–566.

2. Yas Q.M., Khalaf M. A trusted MANET routing algorithm based on fuzzy logic. *Applied Computing to Support Industry: Innovation and Technology: First International Conference, ACRIT 2019, Ramadi, Iraq, September 15–16, 2019, Revised Selected Papers 1* / Springer International Publishing, 2020. P. 185–200.

3. Srilakshmi U., Veeraiah N., Alotaibi Y., Alghamdi S.A., Khalaf O.I., Subbayamma B.V. An improved hybrid secure multipath routing protocol for MANET. *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. P. 163043–163053.

4. Kulakov Y., Kohan A., Kopychko S. Traffic orchestration in data center network based on software-defined networking technology. *International Conference on Computer Science, Engineering and Education Applications* / Springer, Cham, 2019. P. 228–237.

5. Kulakov Y. Load Balancing in Software Defined Networks Using Multipath Routing. *International Conference on Computer Science, Engineering and Education Applications* / Springer, Cham, 2020. P. 384–395.

Кулаков Ю.О., Грабовенко Ю.В., Кузьмич Р.О.

СПОСІБ МАРШРУТИЗАЦІЇ В МОБІЛЬНИХ ПРОГРАМНО-КОНФІГУРОВАНИХ МЕРЕЖАХ НА ОСНОВІ СИСТЕМИ НЕЧІТКОГО ВИВОДУ

Робота присвячена розробці способу маршрутизації на основі системи нечіткого виводу та алгоритму багатошляхової маршрутизації в мобільних програмно-конфігурованих мережах. Запропоновано спосіб маршрутизації, що дозволяє підвищити ефективність схеми вибору маршруту на основі врахування множини метрик та визначення шляху із найвищим значенням стабільності до вказаного вузла призначення за допомогою системи нечіткого виводу.

Використано алгоритм багатошляхової маршрутизації оберненої хвилі, що дозволяє при пошуку шляху між вузлами джерела та призначення знайти шляхи між проміжними вузлами мережі та здійснити динамічну ремаршрутизацію шляху за потреби. Розроблено алгоритм для прогнозування стабільності маршруту для передачі пакетів, з використанням системи нечіткого виводу Мамдані. Даний спосіб допомагає обрати маршрут із низькою ймовірністю руйнування зв'язків під час маршрутизації та зменшити кількість операцій виявлення шляхів від початкової вершини.

Ключові слова: *система нечіткого виводу, динамічна ремаршрутизація, багатошляхова маршрутизація, MANET, SDN.*

Kulakov Y.O., Hrabovenko Y.V., Kuzmych R.O.

ROUTING METHOD IN MOBILE SOFTWARE-DEFINED NETWORKS BASED ON FUZZY INFERENCE SYSTEM

The work is devoted to the development of a routing method based on a fuzzy inference system and a multi-path routing algorithm in mobile software-defined networks. A routing method is proposed that allows increasing the efficiency of the route selection scheme by taking into account a set of metrics and determining the path with the highest stability value to the specified destination node using a fuzzy inference system.

The algorithm of multi-path inverse wave routing is used, which allows finding paths between source and destination nodes and finding paths between intermediate network nodes, and performing dynamic rerouting of the path if necessary. An algorithm for predicting the stability of the route for packet transmission using the Mamdani fuzzy inference system has been developed. This method helps to choose a route with a low probability of link destruction during routing and to reduce the number of path discovery operations from the initial node.

Keywords: *fuzzy inference system, dynamic rerouting, multi-path routing, MANET, SDN.*