

О. Я. СОВА, А. І. МІНОЧКІН, В. А. РОМАНЮК

БАГАТОШЛЯХОВА ЗОНДОВА МАРШРУТИЗАЦІЯ В МЕРЕЖАХ MANET ІЗ ДИНАМІЧНИМ ФОРМУВАННЯМ МЕТРИК ВИБОРУ МАРШРУТУ

Пропоновано метод багатошляхової зондової маршрутизації в мережах MANET із можливістю динамічного вибору метрик пошуку маршруту передавання. Метод реалізується нечітким контролером, який входить до складу вузлової підсистеми управління маршрутизацією і призначений для збору інформації про стан маршрутів і мережі в цілому, аналізу та оцінювання ситуації в мережі й прийняття рішення з вибору метрик пошуку маршрутів, способу розсилання зондів-запитів та необхідної кількості незалежних маршрутів передавання повідомлень, що має забезпечити передавання інформації із заданою якістю обслуговування.

Мобільні радіомережі (Mobile Ad-Hoc Networks, MANET) характеризуються високою динамікою топології, значною розмірністю, низькою пропускну здатністю радіоканалу та неоднорідністю вузлів (за продуктивністю, потужністю й мобільністю). Особливості мереж MANET визначають ключові вимоги до методів маршрутизації (ММ): розподілене функціонування; мінімальна завантаженість мережі службовою інформацією; відсутність зацикленних маршрутів; побудова маршруту згідно з необхідністю; ефективне використання обмежених ресурсів вузлів та радіоканалів; безпечна маршрутизація [1].

Найбільшою мірою зазначеним вимогам відповідають зондові методи маршрутизації, які передбачають побудову маршруту за допомогою розсилання та збору зондів (за потребою). Нині існують численні методи зондової маршрутизації, але найбільш розвиненими є DSR, AODV, TORA, ABR, SSA [1–3].

Кожний із цих методів ефективний за певної ситуації в мережі. Проте єдиного методу маршрутизації, який задовольняв би всі зазначені вимоги МР і забезпечував оптимізацію показників ефективності функціонування мережі за різних умов її роботи, не існує [1; 4; 5]. Крім того, вимоги до передавання різнотипних інформаційних потоків та реальні умови функціонування мережі визначатимуть необхідність використання сукупності параметрів у метриці вибору маршрутів. Так, вимога щодо надійності (безпеки) передавання інформації змушує будувати та підтримувати кілька маршрутів передавання інформації, тоді як передавання різних типів трафіку, у свою чергу, висуває певні вимоги до якості маршрутів.

Одним із варіантів підвищення ефективності використання зондових ММ є реалізація активної маршрутизації [5], яка передбачає такі підходи: функціонування в мережі кількох методів маршрутизації; можливість побудови кількох незалежних маршрутів; динамічне формування метрик вибору маршруту; управління топологією мережі як складовою частиною маршрутизації; інтелектуалізація процесів прийняття рішення з маршрутизації.

Для реалізації цих підходів необхідно створити в кожному вузлі мережі систему управління маршрутизацією, яка виконувала б такі функції: збір інформації про стан мережі, збереження маршрутів, побудова маршрутів, підтримання маршрутів, управління топологією, навчання та забезпечення безпеки (рис. 1).

З огляду на сказане пропонується розробити багатошляховий зондовий метод маршрутизації в мережах MANET з можливістю динамічного формування метрик вибору маршрутів. Цей метод буде реалізовано підсистемами побудови та підтримання маршрутів.



Рис. 1. Концептуальна модель вузлової системи управління маршрутизацією

У запропонованому зондовому ММ побудова маршруту відбувається в п'ять етапів: 1) вибір метрик пошуку маршруту та способу зондування; 2) розсилання зондів-запитів (ЗЗ) із метою визначення стану мережі в разі виявлення незалежних маршрутів передавання; 3) прийом ЗЗ адресатом та вибір маршруту (маршрутів), що задовольняють вимоги передавання; 4) надсилання зонду-відповіді (ЗВ) відправнику з інформацією про отримані маршрути та стан мережі; 5) вибір кількості маршрутів передавання певного типу трафіку з урахуванням ситуації, що склалася в мережі.

Схематично процес побудови маршруту зондовою маршрутизацією подано на рис. 2. Якщо вузол-відправник має потребу передати інформацію, відбувається звернення до підсистеми управління маршрутизацією. Ініціюється створення ЗЗ, засобами якого здійснюватиметься збір інформації про стан мережі для пошуку незалежних маршрутів передавання. Після обробки зонду на приймальному боці формується ЗВ, який надає відправнику інформацію про виявлені маршрути та стан мережі.

Далі з урахуванням типу трафіку та ситуації, що склалася в мережі (мобільність вузлів, рівень навантаження в мережі, розмір черги в проміжних вузлах), на боці відправника відбувається вибір необхідної кількості маршрутів передавання повідомлень та виконується їх відновлення в разі розриву.

Як випливає з рис. 2, функції, що їх виконує вузлова підсистема управління маршрутизацією, можна поділити на дві взаємозалежні групи, виконання яких розділене в часі. *Перша група*: збір інформації про стан мережі; вибір метрик пошуку маршруту та способу зондування. *Друга група*: обробка ЗВ та формування на основі інформації, що міститься в них, області компромісів (області оптимальних рішень, яка складається з m маршрутів); вибір необхідної кількості маршрутів передавання певного типу трафіку з урахуванням стану мережі.

Вузлова підсистема управління маршрутизацією складається з нечіткого контролера, підсистем вибору метрик пошуку маршрутів і вибору незалежних маршрутів передавання даних (рис. 3).

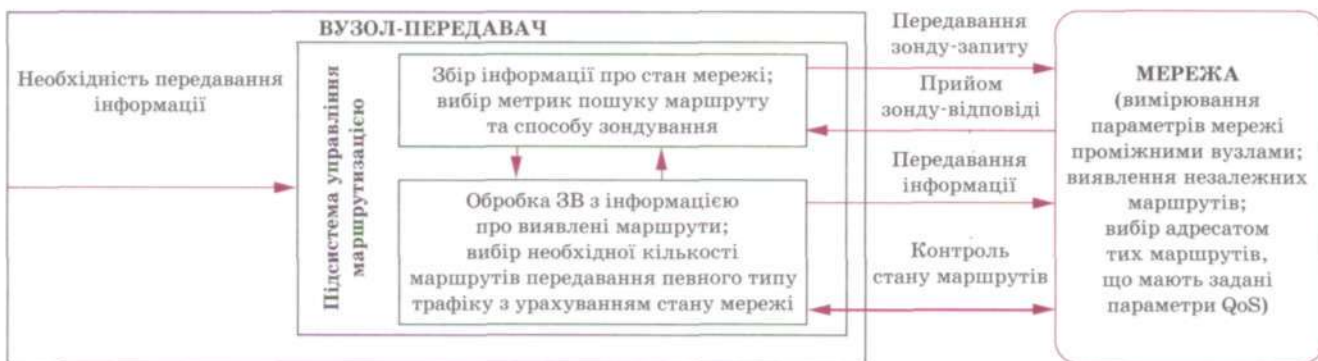


Рис. 2. Схема циклу управління зондовою маршрутизацією



Рис. 3. Нечіткий контролер у підсистемі управління маршрутизацією

Через динамічне поводження мереж MANET, складність формування повної системи показників їх функціонування, неповноту й невірність контрольної інформації пропонується, щоб підсистема управління маршрутизацією приймала рішення за допомогою нечіткого контролера, який використовує апарат нечіткої логіки [10], перетворюючи нечіткий опис керованого процесу та системи його управління (у вигляді нечіткої бази знань) у послідовність команд для досягнення цілей управління маршрутизацією [6].

Отже, контролер міститься в центрі вузлової підсистеми управління маршрутизацією і взаємодіє з підсистемами вибору метрик пошуку маршруту та вибору кількості маршрутів передавання. Отримуючи дані від цих підсистем, контролер оцінює ситуацію в мережі й визначає цілі управління та засоби досягнення мети відповідно до функцій кожної підсистеми.

Вузлова підсистема вибору метрик пошуку маршруту

Мережа подається напрямленим ваговим графом $G = (V, E)$, де V — множина вузлів; E — множина двонапрямлених каналів. Кожний вузол має ідентифікаційний номер. Кожний канал $e = (v_l, v_r) \in E$ і будь-який вузол $v_i \in V$ на момент часу t може характеризуватися вектором оптимізованих параметрів (вимог) $\bar{X} = [x_1, x_2, \dots, x_i]$, $i = \overline{1, I}$ [5]. Усі вузли передають однаковою потужністю, використовується один із протоколів каналного рівня.

Ієрархію процесу прийняття рішень вузловою підсистемою управління маршрутизацією з пошуку маршруту заданої якості унаочнює рис. 4.

найточніше відбиватимуть вимоги, що накладаються з боку того чи іншого типу трафіку та вибору способу розсилання зондів.

При ідентифікації складних об'єктів і процесів, до яких належить система пошуку маршруту в мережах з динамічною топологією, скористатись класичними методами моделювання неможливо через необхідність спиратись на результати натурних експериментів або статистичних даних [7]. Окрім того, система управління мобільною мережею має бути здатною «самонавчатися» (послідовно мінімізувати відхилення фактичного результату діяльності від деякого бажаного еталона) та характеризуватися лінгвістичністю (умінням виражати природною мовою знання, здобуті в результаті навчання). Математичним апаратом, який, на відміну від класичних методів, враховує ці властивості, є *теорія нечітких множин*, що має засоби формалізації натурно-мовних висловлювань та логічного виведення [7].

Модель підсистеми вибору метрик пошуку маршруту та способу розсилання зонду будується на основі нечітких баз знань, які повністю визначають алгоритми поведінки, що реалізуються інтелектуальною підсистемою управління [8]. При побудові інтелектуальної підсистеми управління вибором метрик пошуку маршруту та способу розсилання зонду відповідні знання мають містити:

1) продукційні правила, які задають логіко-лінгвістичний опис моделі управління на рівні якісних взаємозв'язків вхідних і вихідних змінних;



Рис. 4. Ієрархія процесу прийняття рішень з пошуку маршруту заданої якості

Кожний вузол здійснює цикл управління, який складається з таких етапів, як збір даних про стан вузла та стан напряму зв'язку; аналіз та ідентифікація поточної ситуації у вузлі-передавачі та мережі; прийняття керуючих рішень та їх реалізація з метою вибору тих метрик пошуку маршруту, котрі

2) функції належності, які задають класи значень окремих змінних у цілому діапазоні їх можливої зміни.

Проведемо класифікацію вхідних змінних і побудуємо дерево виведення, яке визначає зв'язок між вхідними та вихідними змінними (рис. 5).

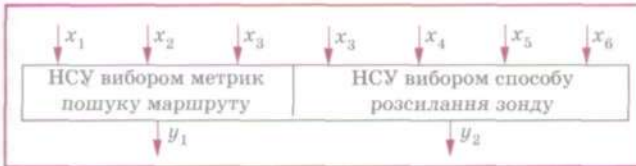


Рис. 5. Дерево виведень.

де вхідні змінні: x_1 — тип трафіку, що передається; x_2 — пріоритет інформації; x_3 — розмір черг в проміжних вузлах; x_4 — залишкова ємність батарей; x_5 — мобільність мережі; x_6 — час затримки передавання; вихідні змінні: y_1 — метрики пошуку маршруту заданої якості; y_2 — спосіб розсилання зонду-запиту

Наступним етапом є побудова матриці знань (табл. 1), яка являє собою таблицю, сформовану за певними правилами:

1. Нехай I — кількість експериментальних даних, які пов'язують входи і виходи об'єкта ідентифікації, роль якого відіграє система управління маршрутом. Розподілимо ці дані в такий спосіб:

$$C = k_1 + k_2 + \dots + k_m, \quad m = \overline{1, M},$$

де k_m — кількість експериментальних даних, які відповідають вихідному рішенням $y_g, g = \overline{1, G}$; M — кількість вихідних рішень, причому в загальному випадку $k_1 \neq k_2 \neq \dots \neq k_m$.

Пронумеруємо I експериментальних даних так:

11, 12, ..., $1k_1$ — номери комбінацій вхідних змінних для рішення y_1 ;

21, 22, ..., $2k_2$ — номери комбінацій вхідних змінних для рішення y_2 ;

...

$m1, m2, \dots, mk_m$ — номери комбінацій вхідних змінних для рішення y_g^h ;

...

$M1, M2, \dots, Mk_M$ — номери комбінацій вхідних змінних для рішення y_G^H .

2. Розмір матриці дорівнює $(I + 1) \times C$, де $(I + 1)$ — кількість її стовпців, а $C = k_1 + k_2 + \dots + k_m, m = \overline{1, M}$ — кількість рядків.

3. Перші I стовпців матриці відповідають вхідним змінним $x_i, i = \overline{1, I}$, а $(I + 1)$ -й стовпець — значенням y_g вихідної змінної ($g = \overline{1, G}$).

4. Кожний рядок матриці являє собою деяку комбінацію значень вхідних змінних x_i , що їх експерт відносить до одного з можливих значень вихідної змінної y_g .

5. Елемент x_i^{mk} , що міститься на перетині i -го стовпця та mk -го рядка, відповідає лінгвістичній оцінці параметра x_i у рядку нечіткої бази знань із номером mk . При цьому лінгвістична оцінка x_i^{mk} вибирається з терм-множини, що відповідає змінній x_i , тобто $x_i^{mk} \in A_i, m = \overline{1, M}, i = \overline{1, I}$.

Уведена матриця знань визначає систему логічних висловлювань «ЯКЩО <умова> ТО <дія>»,

ІНАКШЕ...», які пов'язують значення вхідних змінних x_1, \dots, x_N стану напряму зв'язку з одним

із можливих типів рішення $y_g (g = \overline{1, G})$, яке полягає у виборі метрик пошуку маршруту заданої якості або способу розсилання ЗЗ:

$$\begin{aligned} \text{ЯКЩО } & (x_1 = x_1^{11}) \text{ I } (x_2 = x_2^{11}) \text{ I } \dots \text{ I } (x_i = x_i^{11}) \text{ АБО} \\ & (x_1 = x_1^{12}) \text{ I } (x_2 = x_2^{12}) \text{ I } \dots \text{ I } (x_i = x_i^{12}) \text{ АБО...} \\ & (x_1 = x_1^{1k_1}) \text{ I } (x_2 = x_2^{1k_1}) \text{ I } \dots \text{ I } (x_i = x_i^{1k_1}) \\ \text{ТО } & y = y_1^1, \text{ ІНАКШЕ...} \\ \text{ЯКЩО } & (x_1 = x_1^{m1}) \text{ I } (x_2 = x_2^{m1}) \text{ I } \dots \text{ I } (x_i = x_i^{m1}) \text{ АБО} \\ & (x_1 = x_1^{m2}) \text{ I } (x_2 = x_2^{m2}) \text{ I } \dots \text{ I } (x_i = x_i^{m2}) \text{ АБО...} \\ & (x_1 = x_1^{mk_2}) \text{ I } (x_2 = x_2^{mk_2}) \text{ I } \dots \text{ I } (x_i = x_i^{mk_2}) \\ \text{ТО } & y = y_1^2, \text{ ІНАКШЕ...} \\ & (x_1 = x_1^{M1}) \text{ I } (x_2 = x_2^{M1}) \text{ I } \dots \text{ I } (x_i = x_i^{M1}) \text{ АБО} \\ & (x_1 = x_1^{M2}) \text{ I } (x_2 = x_2^{M2}) \text{ I } \dots \text{ I } (x_i = x_i^{M2}) \text{ АБО...} \\ & (x_1 = x_1^{Mk_M}) \text{ I } (x_2 = x_2^{Mk_M}) \text{ I } \dots \text{ I } (x_i = x_i^{Mk_M}) \\ \text{ТО } & y = y_G^H. \end{aligned} \quad (1)$$

де $y_g^h (g = \overline{1, G}; h = \overline{1, H})$ — лінгвістична оцінка вихідної змінної y , визначеної з терм-множини можливих рішень D ; x_i^{mk} — лінгвістична оцінка вхідної змінної x_i у k -му рядку m -ї диз'юнкції, яка вибирається з відповідної терм-множини $A_i, i = \overline{1, I}; k_j$ — кількість правил, які визначають значення вихідної змінної $y = y_g^h$.

Нечітка система управління вибором метрик пошуку маршруту та способу розсилання зондів формує продукційні правила (1), на основі яких відбувається прийняття управляючих рішень, що полягає у виборі метрик пошуку маршруту заданої

Таблиця 1

Матриця знань

Номер вхідної комбінації значень	Вхідні змінні				Вихідні змінні
	x_1	x_2	... x_i ...	x_I	
11	x_1^{11}	x_2^{11}	... x_i^{11} ...	x_I^{11}	y_1^1
12	x_1^{12}	x_2^{12}	... x_i^{12} ...	x_I^{12}	
...	
$1k_1$	$x_1^{1k_1}$	$x_2^{1k_1}$... $x_i^{1k_1}$...	$x_I^{1k_1}$	
⋮					
$j1$	x_1^{m1}	x_2^{m1}	... x_i^{m1} ...	x_I^{m1}	y_g^h
$j2$	x_1^{m2}	x_2^{m2}	... x_i^{m2} ...	x_I^{m2}	
jk_j	$x_1^{mk_m}$	$x_2^{mk_m}$... $x_i^{mk_m}$...	$x_I^{mk_m}$	
⋮					
$J1$	x_1^{M1}	x_2^{M1}	... x_i^{M1} ...	x_I^{M1}	y_G^H
$J2$	x_1^{M2}	x_2^{M2}	... x_i^{M2} ...	x_I^{M2}	
...	
Jk_j	$x_1^{Mk_M}$	$x_2^{Mk_M}$... $x_i^{Mk_M}$...	$x_I^{Mk_M}$	

якості y_1 та способу розсилання зонду y_2 . З метою мінімізації службового трафіку в поля ЗЗ вносяться значення тільки тих параметрів, які найбільш критично впливають на передавання того чи іншого типу трафіку. Значення цих параметрів уміщуються у відповідні поля ЗЗ у вигляді припустимих значень. Проміжні вузли обробляють зонди, порівнюючи реальні значення параметрів із заданими в ЗЗ. Для зменшення обсягу ЗЗ до формату зонду включаються тільки ті параметри вузлів та каналів, які виходять за межі норми.

Залежно від ситуації, що склалася в мережі, можливі різні способи зондування. З метою обмеження кількості зондів, що розсилаються в мережі, використовується локальне зондування, яке передбачає розсилання зондів в обмеженій зоні мережі. Для цього у формат зонду вводиться поле TTL (Time-To-Life), $TTL = h_p$. Кожний вузол при ретрансляції зонду віднімає від поточного значення TTL одиницю. Якщо значення $TTL = 0$, то зонд знищується. На етапі побудови маршруту вузол може використовувати спосіб локального зондування k раз зі змінною глибиною зондування ($TTL_1 = 2$, $TTL_2 = 4$, ..., $TTL_k = 2k$). Це дасть змогу зменшити кількість зондів у ситуації, коли адресат перебуває за кілька ретрансляцій від відправника. Однак цей спосіб може збільшити час побудови маршруту при значній відстані до адресата [9].

У разі, коли при передаванні певного типу інформації критичним параметром є час передавання $t_{пл}$, можливим рішенням є випереджувальна побудова нового маршруту. Таке рішення може приймати:

♦ *відправник*: прогнозує час існування всього первинного маршруту. Для цього кожний проміжний вузол при поширенні ЗЗ включає в нього прогнозований час існування каналу $t_{i,k}$ даного маршруту m . Отримавши ЗЗ, адресат визначає час існування маршруту $t_{i,m} = \min\{t_{i,kij}\}$, $(i, j) \in m$ і включає це значення у ЗВ. Отримавши ЗВ, відправник буде знати час початку побудови нового маршруту [9];

♦ *кожний проміжний вузол*: проміжні вузли оцінюють стан радіоканалів, які використовуються активними маршрутами, і в разі погіршення їхньої якості нижче від деякого визначеного рівня (який ще не призводить до відсутності зв'язку), надсилають повідомлення до вузла-відправника про необхідність переходу на інші маршрути (пошуку нових маршрутів).

Підсистема вибору незалежних маршрутів передавання

До протоколів, які сьогодні використовують багатошляхове передавання в безпроводових мережах, належать DSR [10], SMR [11] та ВЗММ [12]. Проте зазначені методи використовують додаткові шляхи, якщо відмовляє первинний, але не перед-

бачають побудови цілком незалежних шляхів передавання. Розглянемо умови вибору незалежних шляхів.

1. Незалежність шляхів по вузлах, що дає змогу розділити вхідний трафік і тим самим більш рівномірно завантажити мережу, зменшити затримку в передаванні повідомлень. Надалі будемо розглядати незалежність шляхів по вузлах.

2. Мінімальна різниця довжини альтернативного шляху порівняно з первинним (найкоротшим).

3. Мінімальне значення параметра кореляції η — кількість взаємних каналів між незалежними шляхами. Два цілком незалежні шляхи, які мають зв'язність один з одним, створюватимуть взаємні перешкоди через ширококомовну природу радіоканалу. Для врахування взаємного впливу незалежних шляхів по каналах введемо параметр кореляції η . Якщо $\eta = 0$, то це означає що шляхи цілком незалежні. Залежно від кількості використовуваних каналів у мережі цей параметр може набувати різних значень: у разі багатьох каналів цей параметр може бути обмежений деякою константою, у разі використання єдиного каналу всіма вузлами мережі бажано взяти $\eta = 0$.

Введемо кілька позначень. Шлях p_r між вузлами v_1 і v_N являє собою зростаючу послідовність вузлів $\langle v_1, \dots, v_n, \dots, v_N \rangle$, таких що кожний канал $(v_{n-1}, v_n) \in E$. Вузол v_n називається проміжним вузлом, якщо $1 < n < N$. Вузли v_1 і v_N містяться в окремих підмережах, якщо між ними не існує шляху. Орієнтованим (кореневим) деревом назвемо граф $G' \in G$, в якому дерево з коренем у вузлі-джерелі (вузол S) містить усі вузли V . Кореневе дерево має таку властивість: для кожного вузла існує єдиний шлях, що веде в цей вузол із кореня. Підграф графа G'' , породжений множиною, яка складається з вузла b і всіх його нащадків, називатимемо піддеревом із коренем в b .

Необхідно розробити метод побудови та підтримки множини незалежних маршрутів $P = \{p_1, \dots, p_r, \dots, p_R\}$, $r = \overline{1, R}$, передавання повідомлень, що задовольняє такі умови:

- 1) $m \geq \alpha$ — отримання не менш як α незалежних шляхів передавання;
- 2) $L_r - L_{\min} \leq h$ — довжина p_r маршруту не перевищує довжини найкоротшого маршруту p_{\min} на h ретрансляцій;
- 3) $\min k$ — мінімум взаємних каналів між даними шляхами;
- 4) цільова функція подається у вигляді

$$U = f(t_{пл}^{s-d}, S^{s-d}) \rightarrow \text{opt}, \quad (2)$$

де $t_{пл}^{s-d}$ — середній час передавання повідомлень між передавачем s та адресатом d ; S^{s-d} — сумарна ширина смуги пропускання між передавачем s та адресатом d .

Розв'язання цієї задачі поділимо на дві складові. Перша — побудувати множину незалежних маршрутів (виконується на боці приймача); друга — вибрати з даної множини маршрути, які задовольняють вимоги, що накладаються з боку трафіку, який передається.

1. Правила для побудови незалежних маршрутів визначаються теоремами, доведеними в [12].

Теорема 1. Нехай у мережі використовується метод маршрутизації DSR. Якщо після прийому й обробки ЗЗ адресатом D від відправника S отримано два шляхи $P_1 = \langle S, v_1, \dots, v_n, D \rangle$ і $P_2 = \langle S, u_1, \dots, u_m, D \rangle$ зі спільними k вузлами ($k < m$ і $k < n$), то $v_1 = u_1, v_2 = u_2, \dots, v_k = u_k$.

Із цієї теореми випливає, що коли адресат прийняв ЗЗ за відсутності незалежних шляхів по вузлах, то це означає: дані шляхи мають спільні вузли на початку маршруту. Тому об'єднання всіх маршрутів, прийнятих адресатом, буде частиною кореневого дерева з коренем у відправнику (якщо не брати до уваги останньої ретрансляції). Зазначимо, що теорема правильна для будь-якого вузла, досяжного від відправника.

Теорема 2. Якщо для орієнтованого дерева з коренем у вузлі S вузли v і u належать різним піддеревам та існує напрямлений канал між ними, то, принаймні два незалежні шляхи по вузлах існують між вузлом v (чи u) і вузлом S .

Використаємо евристики, здобуті з наведених теорем, для формування етапів побудови незалежних маршрутів.

❖ Вузол-відправник S у разі необхідності побудови α -незалежних шляхів передавання з вузлом-адресатом D посилає йому ЗЗ з ознакою необхідності багатозлахової маршрутизації (біт $F = 1$) і значеннями α і r . Орієнтовний варіант послідовності прийому вузлами мережі ЗЗ ілюструє рис. 6.

❖ Проміжний вузол v діє в такий спосіб: якщо прийнято дублікат зонду з певним порядковим номером, то отриманий маршрут від s до v заноситься в маршрутну таблицю або кеш. Крім самого маршруту в таблицю записуються дані про

адреси вузлів-сусідів та їхню вартість. Таким чином відбувається процес «навчання» побудови маршрутів. Після цього адреса вузла v додається до записаного маршруту, що міститься в заголовку зонду, а зонд передається наступним вузлом.

Кожний проміжний вузол v , прийнявши вперше ЗЗ зі значенням $F = 1$, здійснює прийом всіх наступних ЗЗ і їх обробку (а не знищує їх як у DSR). У разі отримання проміжним вузлом зонду з номером, який повторюється, такий зонд стирається, чим унеможливується використання одного вузла при побудові кількох маршрутів та створення маршрутів із зацикленням. Рішення про відповідність маршруту заявленим вимогам приймається адресатом d . Тільки вузол d уповноважений надіслати повідомлення з підтвердженням на ЗЗ і відповідає за вибір незалежних маршрутів передавання [10].

❖ Після обробки першого ЗЗ адресатом d він по зворотному шляху передає ЗВ до передавача з інформацією про маршрут (критерій вибору маршруту визначається цільовою функцією (2)). Далі здійснюється прийом (протягом деякого проміжку часу) решти ЗЗ і проводиться їх аналіз [10]. Якщо отримані маршрути задовольняють задані вимоги, то вузол передає ЗВ зворотними маршрутами проходження відповідних ЗЗ. У протилежному разі адресат аналізує маршрути, які мають від одного до k спільних вузлів (рис. 6, б). За їх наявності вузол відправляє зонди відповіді до k -го вузла (рис. 6, в) незалежними шляхами з інформацією про отримане маршрутне піддерево і прапорцем $R = 1$, що визначає необхідність переспрямування ЗВ.

❖ У свою чергу, проміжний вузол z маршрутного піддерева, отримавши ЗВ з прапорцем $R = 1$, аналізує вміст свого кеша і здійснює пошук незалежних маршрутів, які могли бути отримані за рахунок «навчання» побудови маршрутів у ході функціонування мережі або передавання ЗЗ. Якщо такі маршрути існують, ЗВ спрямовується по альтернативних шляхах до передавача з прапорцем $R = 0$, інакше — ЗВ передається далі по вузлах маршрутного піддерева, визначеного адресатом [10; 13].

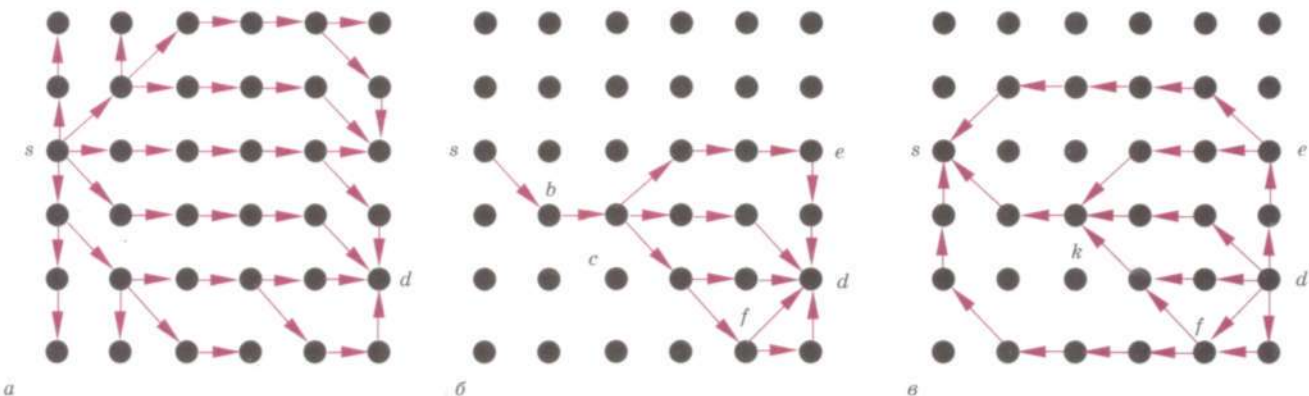


Рис. 6. Приклад вибору незалежних маршрутів:

a — послідовність розсилання ЗЗ; b — піддерево маршрутів, отримане адресатом; c — переспрямування ЗВ вузлами піддерева

Для обчислення відправником параметра кореляції к отриманих маршрутів передавання кожний проміжний вузол включає у формат ЗВ список сусідніх вузлів.

2. Другий етап побудови незалежних маршрутів передавання виконується на боці відправника. ВВ s приймає ЗВ і формує множину припустимих маршрутів доставки повідомлень. Далі залежно від типу трафіку, що передається, та стану мережі, приймається рішення щодо вибору кількості незалежних маршрутів для передавання того чи іншого типу трафіку з необхідним рівнем QoS. Кожний ЗВ містить у відповідних полях інформацію про стан мережі, яка використовується для оцінювання ситуації, що склалася, шляхом збору та аналізу даних про тип трафіку, ширину смуги пропускання, час затримки передавання для окремого маршруту, розмір черги у проміжних вузлах та їхню мобільність. Для цього рівень маршрутизації взаємодіє з каналним, транспортним та прикладним рівнями моделі OSI.

Підсистема збору інформації (див. рис. 3) вимірює та оцінює параметри стану мережі, які у вигляді значень змінних $x_1, x_2, \dots, x_i, i = \overline{1, I}$, передаються на вхід блока формування та розпізнавання об'єктів.

У загальному випадку цикл управління полягає в тому, щоб на основі аналізу поточного стану об'єкта управління (змінні x_i стану мережі) виробити такий управляючий вплив, що забезпечить вибір значення керованої змінної (d — кількість незалежних маршрутів), реалізація якої приведе до бажаного поведіння або стану об'єкта [9].

Задача прийняття рішення полягає в тому, щоб на основі інформації про вектор входів X^2 визначити вихід $y^* \in Y$. Необхідною умовою формального розв'язання такої задачі є наявність залежності

$$y = f_y(x_1, x_2, \dots, x_i). \quad (3)$$

Проведемо класифікацію входних змінних і побудуємо дерево виведення, яке визначає систему вкладених одне в одне висловлень меншої розмірності (рис. 7).

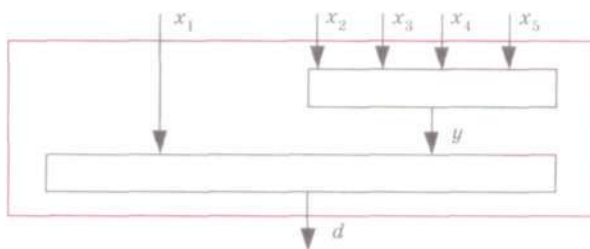


Рис. 7. Дерево виведень, де входні змінні: x_1 — тип трафіку; x_2 — час затримки передавання повідомлення; x_3 — ширина смуги пропускання, x_4 — мобільність вузлів; x_5 — розмір черги в проміжних вузлах; проміжна лінгвістична змінна: y — стан мережі; вихідна змінна: d — рішення з вибору кількості маршрутів

Із рис. 7 випливає, що вхідна змінна x_1 напряму пов'язана з вихідною змінною d , а вхідні змінні x_2, \dots, x_5 пов'язані з виходом d через проміжну лінгвістичну змінну y .

Нечітка база знань, будується на основі експериментальних даних у вигляді матриці знань. Кожний рядок матриці являє собою деяку комбінацію значень входних змінних, які пов'язуються експертом з одним із можливих значень вихідної змінної y за допомогою системи логічних висловлювань «ЯКЩО <умова> ТО <дія>, ІНАКШЕ...».

Можна, скажімо, подати нечіткі правила у вигляді табл. 2, де кожна клітинка є результатом зіставлення двох входних змінних: стану мережі та типу трафіку. Точність роботи системи залежить від досвіду експерта і його можливості передбачити якомога більше варіантів її поведіння.

Таблиця 2

Таблиця нечітких правил

Стан мережі	Тип трафіку (вхідна змінна x_1)		
	Дані про маршрут	Потоковий трафік	Трафік реального часу
Незадовільний	Відкидається	Кілька маршрутів	Усі маршрути
Задовільний	Відкидається	Один маршрут	Усі маршрути
Добрий	Один маршрут	Один маршрут	Кілька маршрутів
Відмінний	Один маршрут	Один маршрут	Кілька маршрутів

Рішення про стан мережі приймає нечітка система на основі інформації, що міститься в базі знань (змінні x_2, x_3, x_4, x_5). Мінімально необхідний склад бази знань наведено в табл. 3.

Таблиця 3

Склад бази знань нечіткої системи прийняття рішень про стан мережі

Змінна	Значення змінних
Вхідні змінні	
x_2 — час затримки передавання	a_2^1 — ВИСОКИЙ; a_2^2 — СЕРЕДНІЙ; a_2^3 — НИЗЬКИЙ
x_3 — ширина смуги пропускання	a_3^1 — НИЗЬКА; a_3^2 — СЕРЕДНЯ; a_3^3 — ВИСОКА
x_4 — мобільність мережі	a_4^1 — ВИСОКА; a_4^2 — СЕРЕДНЯ; a_4^3 — НИЗЬКА
x_5 — розмір черг у проміжних вузлах	a_5^1 — ВИСОКИЙ; a_5^2 — СЕРЕДНІЙ; a_5^3 — НИЗЬКИЙ
Проміжна змінна	
y — стан мережі	b_1^1 — НЕЗАДОВІЛЬНИЙ; b_1^2 — ЗАДОВІЛЬНИЙ; b_1^3 — ДОБРИЙ; b_1^4 — ВІДМІННИЙ

На основі рішень про стан мережі та залежно від типу трафіку вузол-передавач приймає рішення з маршрутизації, яке полягає у виборі кількості

маршрутів для передавання повідомлень. Тількино відправник отримує перше повідомлення із підтвердженням про наявний маршрут, він відразу розпочинає передавання інформації за виявленим маршрутом з метою скорочення часу, необхідного для пошуку маршруту, що притаманне зондовій маршрутизації [10]. Якщо в ході передавання отримуються інші маршрути, то залежно від пріоритету (типу) повідомлень вони використовуються в поточній сесії або перебувають у резерві на випадок втрати основного маршруту.

Література

1. Миначкин А. И., Романюк В. А. Маршрутизация в мобильных радиосетях: проблема и пути ее решения // *Зв'язок*.— 2006.— № 6.— С. 15–21.
2. T. Plesse, C. Adjih, P. Minet, A. Laouiti, A. Plakoo, M. Badel, P. Muhlethaler, P. Jacquet, J. Lecomte. OLSR performance measurement in a military mobile ad hoc network // *Ad Hoc Networks Journal*.— March 2004.— Vol. 3, Issue 5.— P. 575–588.
3. Миначкин А. И., Романюк В. А. Управление качеством обслуживания в мобильных радиосетях // *Зв'язок*.— 2005.— № 7.— С. 54–58.
4. Миначкин А. И., Романюк В. А. Протоколы маршрутизации в мобильных радиосетях // *Зв'язок*.— 2001.— № 1.— С. 31–36.
5. Романюк В. А. Активная маршрутизация в мобильных радиосетях // *Зв'язок*.— 2002.— № 3.— С. 21–25.
6. Миначкин А. И., Романюк В. А. Методы принятия решений системой управления мобильной радиомережей // *Зб. наук. праць*.— К.: ВІПІ НТУУ «КПІ», 2006.— № 1.— С. 66–71.
7. Герасимов Б. М., Дивизинюк М. М., Субач И. Ю. Системы поддержки принятия решений: проектирование, применение, оценка эффективности. Монография.— Севастополь: НИЦ ВСУ, 2004.— 320 с.
8. Ротштейн А.П. Интеллектуальные технологии идентификации: нечеткие множества, генетические алгоритмы, нейронные сети.— Винница: УНИВЕРСУМ, 1999.— 320 с.
9. Миначкин А. И., Романюк В. А., Скрыпник Л. В. Способы повышения эффективности функционирования зондовой маршрутизации в мобильных радиосетях // *Зв'язок*.— 2003.— № 6.
10. Janson D., Maltz D. Dynamic Source Routing in Ad Hoc Wireless Networks // *Mobile computing*.— 1996.— P. 153–179.
11. Sung-Ju Lee, Mario Gerla. Split Multipath Routing with Maximally Disjoint Paths in Ad Hoc Networks, Proceedings of ICC 2001, Helsinki, Finland, June 2001.
12. Миначкин А. И., Романюк В. А. Метод маршрутизації інформаційних потоків для нового покоління автоматизованих мереж радіозв'язку військового призначення // *Тр. НАДУ*.— К.: НАДУ, 2001.— № 28.— С. 130–139.
13. Миначкин А.И., Романюк В.А. Многопутевая маршрутизация в мобильных радиосетях // *Зв'язок*.— 2004.— № 6.— С. 65–69.