

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИЙ МЕТОД МАРШРУТИЗАЦІЇ В МОБІЛЬНИХ РАДІОМЕРЕЖАХ (MANET)

В статті пропонується метод маршрутизації інформаційних потоків в мережах з динамічною топологією, суть якого полягає у динамічному виборі цільової функції управління маршрутами, типу маршрутизації, кількості маршрутів та способу зондування мережі при побудові нового та підтриманні існуючого маршруту передачі.

В статье предлагается метод маршрутизации информационных потоков в сетях с динамической топологией, идея которого заключается в динамическом выборе целевой функции управления маршрутами, типа маршрутизации, количества маршрутов и способа зондирования при построении нового и поддержании существующего маршрута передачи.

In the article presents new routing method for the mobile Ad-Hoc networks, consists in dynamic selection of control efficiency function, routing mode, quantity of the routes and probing method for the routes construction and routes maintenance.

Ключові слова: мобільна радіомережа, метод маршрутизації.

Актуальність досліджень

Розглядається динамічна архітектура побудови мобільних радіомереж (МР), яка передбачає відсутність базових станцій і фіксованих маршрутів передачі інформації (так звані мережі MANET – Mobile Ad-Hoc Networks) [1, 2]. Усі вузли мережі мобільні та обмінюються інформацією безпосередньо між собою чи застосовують ретрансляцію пакетів. Під вузлом мережі розуміється радіотермінал з функціями маршрутизатора чи переносний комп'ютер, який оснащений маршрутизатором і прийомопередавачем. Прикладами застосування таких мереж можуть служити мережі радіозв'язку, які створюються в умовах надзвичайних ситуацій, при обміні інформацією під час проведення різних конференцій, олімпіад, а також перспективна МР тактичної ланки управління [1] тощо. Дані мережі характеризуються:

- динамічною топологією (вузли мережі мобільні; канали радіозв'язку нестабільні і мають обмежену дальність зв'язку і пропускну здатність);
- обмеженою енергетичною можливістю деяких вузлів;
- значною розмірністю (сотні та тисячі вузлів);
- обмеженою безпекою.

Однією з основних задач оперативного управління МР є маршрутизація інформаційних потоків [2]. Особливості МР обумовлюють ключові вимоги до методів маршрутизації (ММ): розподілене функціонування; мінімальне завантаження мережі службовою інформацією при реакціях на зміни в мережі; відсутність зациклення маршрутів; швидка збіжність. Крім того, необхідність передачі різних типів трафіка вимагає різних мережових та вузлових ресурсів, з метою забезпечення відповідних вимог до якості обслуговування (QoS).

Аналізу та синтезу методів маршрутизації для МР присвячена велика кількість робіт [3–8], однак вони розраховані на визначену величину зміни топології мережі та її розмірність (не адаптовані до реальної ситуації в мережі), не враховують інформацію про поточний стан мережі, не здатні приймати інтелектуальні рішення з пошуку маршруту [2]. Тому розробка нових ММ, здатних виправити зазначені недоліки, є актуальним завданням на сьогоднішній день.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Усі відомі методи маршрутизації можна розділити на три основні класи: таблично-орієнтовані, зондові та гібридні [2]. Для таблично-орієнтованих методів маршрутизації відомі два підходи для обчислення найкоротшого шляху в мережі в залежності від того, якою інформацією володіє вузол про стан мережі:

1. Кожен вузол мережі має повну інформацію про стан мережі (у мережі Internet найкоротший шлях обчислюється за алгоритмом Дейкстри – протокол OSPF) [2, 9].

2. Кожен вузол мережі має часткову інформацію про стан мережі (для пошуку найкоротшого шляху використовується алгоритм Белмана-Форда – протокол RIP у Internet) [2, 9].

На жаль, жоден з цих підходів не відповідає сформульованим вимогам. Підхід з повною інформацією для обчислення найкоротшого шляху в мережі вимагає великої кількості інформації про стан мережі, що надійно доставлялася б кожному вузлу від всіх інших вузлів мережі. Ця інформація повинна посилатися при кожній зміні структури мережі чи вартості каналу. Затримки в доставці такої інформації, особливо в МР, а також додаткове навантаження на мережу службовими повідомленнями значні. Алгоритм Белмана-Форда вимагає рішення проблеми „кінцевого рахунку”, викликає заиклення маршрутів протягом його виконання, вимагає n ітерацій (де n – кількість вузлів у мережі) для збіжності.

Основна відмінність зондових методів маршрутизації від таблично-орієнтованих методів у тім, що вузли формують маршрут передачі інформації у разі необхідності, шляхом розсилання мережею спеціальних пакетів (зондів-запитів) і збору зондів-відповідей, які містять інформацію про можливі маршрути передачі інформації. Тому зондова маршрутизація припускає два основних етапи функціонування: створення маршруту і його підтримка в актуальному стані. Представниками зондових методів маршрутизації є DSR, AODV, TORA, ABR, SSR тощо [1, 2]. Для зондових методів маршрутизації характерний значний службовий трафік і визначена інерційність у побудові маршрутів.

Проведені дослідження [2, 10] показали, що таблично-орієнтовані методи маршрутизації ефективні при незначній динаміці мережевої топології, зондові методи – при середньому і високих значеннях зміни топології. Загальна порівняльна характеристика зондових і табличних методів представлена в таблиці 1.

Таблиця 1

Порівняльна характеристика зондових і табличних методів маршрутизації

Методи маршрутизації	Зондові	Таблично-орієнтовані
Характеристика		
Побудова маршрутів	До певних вузлів у разі необхідності на основі зондування мережі (–) Затримка в отриманні маршруту (+) Побудова у разі необхідності	Постійно, кожним вузлом до всіх вузлів на основі обміну маршрутними таблицями та обчислення маршруту (+) Маршрут вибирається без затримки (–) Постійний службовий трафік
Об'єм службового трафіка: – висока динаміка топології – низька динаміка топології	(+) менше (–) більше	(–) більше (+) менше

Як видно з (табл. 1) зондові ММ в більшій мірі відповідають характеристикам мобільних радіомереж (мобільність вузлів та нестабільність радіоканалів), а також раніше зазначеним вимогам до ММ. Однак, і вони характеризуються деякими недоліками:

– значний об'єм службового трафіка $V_{ст}$, викликаний хвильовим характером поширення зонду-запиту;

– значний час побудови $t_{пм}$ маршруту;

– використання єдиної метрики вибору найкоротшого шляху: кількість ретрансляцій (AODV та DSR);

– зростання заголовку пропорційно до розміру мережі та ін.

З метою підвищення ефективності функціонування мережі запропоновано використати наступні способи усунення вказаних недоліків зондових ММ [11, 14]: обмеження кількості та об'єму зондів, які передаються; зменшення часу побудови маршруту та передачі інформації; використання методів багатопараметричної, багатопляхової та активної маршрутизації. Зазначені способи можуть бути реалізовані наступними підходами:

1. Інтелектуалізація процесів прийняття рішення з маршрутизації;
2. Динамічне формування метрик вибору маршруту;
3. Наявність можливості побудови декількох незалежних маршрутів;
4. Функціонування в мережі декількох методів маршрутизації;
5. Управління топологією МР, як складовою частиною маршрутизації в МР [12] тощо.

Також слід зазначити, що кожен тип трафіка при передачі в мережі, вимагає побудови та підтримання маршрутів передачі з метою забезпечення відповідної якості обслуговування. Тому для досягнення ефективного функціонування МР, в залежності від динаміки мережевої топології та вимог до передачі різних типів трафіка, пропонується інтелектуалізувати процес прийняття рішення з маршрутизації шляхом використання апарата нечіткої логіки, основним компонентом якого є база правил нечітких продукцій, що займає центральне місце в процедурах нечіткого виводу.

Отже, виникає актуальне наукове завдання, що полягає в розробці нового інтелектуального методу маршрутизації (НІММ) в мобільних радіомережах шляхом застосування апарата нечіткої логіки.

Метою наукового дослідження, суть якого викладено в статті, є інтелектуалізація процесу прийняття рішень з вибору маршрутів передачі шляхом використання нечіткої логіки для забезпечення передачі інформації із заданою якістю обслуговування.

Опис нового інтелектуального методу маршрутизації

Суть методу. Розробка будь-якого ММ повинна включати синтез наступних основних функцій: збір і розсилання інформації про стан мережі, збереження маршрутної інформації, обчислення маршрутів та ін. [2]. В НІММ пропонується введення ієрархії процесу прийняття рішення з пошуку маршруту заданої якості, яка включає наступні етапи: вибір цільової функції управління маршрутами (побудова маршруту мінімальної (заданої) вартості за вибраними метриками), типу маршрутизації, кількості маршрутів та способу зондування в мережі. Виконання цих функцій можливе тільки за умови реалізації системи управління в кожному вузлі МР, до складу якої буде входити підсистема управління маршрутизацією [13]. Розглянемо зазначені функції детальніше.

а) Вибір цільової функції управління маршрутами, шляхом визначення відповідних метрик пошуку маршруту (багатопараметрична маршрутизація).

В більшості запропонованих ММ використовується однопараметрична маршрутизація, яка при виборі найкоротшого шляху враховує тільки один параметр (зазвичай, кількість ретрансляцій або час доставки повідомлень). Однак, вимоги до передачі інформації із заданою якістю обслуговування можуть виражатися наступними параметрами: пропускна спроможність, затримка передачі, кількість ретрансляцій, ймовірність доставки, кількість адресатів, сміність батарей, безпека та ін. Ці параметри будуть визначати стан мережі (напряму) в кожен момент часу її функціонування, а відповідно і ціль її функціонування (максимізація пропускної спроможності та „часу життя” батарей, мінімізація часу доставки інформації та потужності передавачів). Тобто необхідно говорити про оптимізацію зазначених параметрів або про маршрут із заданою якістю обслуговування (QoS-маршрутизація) [2].

б) Вибір типу маршрутизації (однокористувальницька чи групова). Умови функціонування МР передбачають розсилання інформації певній групі користувачів. В якості багатоадресної інформації можуть виступати групові аудіо/відео конференції, сумісна робота групових прикладних програм, поширення різної інформації (новин, метеоданих, телеметрія та ін.). тому для ефективного використання мережевих ресурсів виникає задача групової маршрутизації (multicasting), яка передбачає побудову і підтримання маршрутів передачі інформації типу „один-до-багатьох” або „багато-до-багатьох”.

в) Вибір кількості маршрутів (один чи декілька). Використання багатошляхової маршрутизації дозволить: збільшити надійність доставки інформації (при відмові одного каналу використовується альтернативний канал), підвищити безпеку передачі інформації (передача пакетів одного повідомлення різними маршрутами ускладнить їх перехоплення),

скоротити обсяг службового трафіка (рідше здійснюється перебудова маршруту) і зменшити час доставки інформації (при розподілі вхідного навантаження за декількома незалежними маршрутами передачі).

г) **Вибір способу розсилання службової інформації в мережі.** Одними з основних недоліків зондової маршрутизації є значні об'єми службового трафіка та час побудови маршруту, який залежить від глибини зондування та розміру зонду-запиту. Тому пропонується використовувати сукупність способів усунення зазначених недоліків [14]:

1. Локальне зондування (обмеження зони розсилання зондів величиною h_p): мінімізація кількості зондів-запитів $N_{зз}$, які розсилаються в мережі, може бути здійснена шляхом введення в формат зонду поля TTL (*Time-To-Live*), $h_p = TTL$. В результаті, кожен вузол при ретрансляції зонду віднімає з поточного значення TTL одиницю. Якщо значення $TTL = 0$, то зонд знищується.

2. Випереджаюча побудова нового маршруту: для різних типів трафіка, наприклад мови, величина часу передачі $t_{пд}$ має граничне значення. Можливим рішенням в даній ситуації є прогнозування часу існування маршруту та випереджаюча побудова нового маршруту (відправником або проміжними вузлами).

3. Побудова маршрутів (зондування) адресатом. Організаційно-технічна побудова мережі може визначати перелік адресатів, з якими буде постійно підтримуватися інформаційний обмін більшістю вузлів мережі. Тому для скорочення кількості зондів-запитів при побудові маршрутів відправниками доцільно покласти функцію побудови маршрутів на адресата. Він буде здійснювати періодичне зондування мережі для постійного підтримання маршрутів до відправників.

Процес побудови маршрутів здійснюється згідно правил функціонування зондових методів маршрутизації. Схематично процес взаємодії вузлів зображено на (рис. 1).

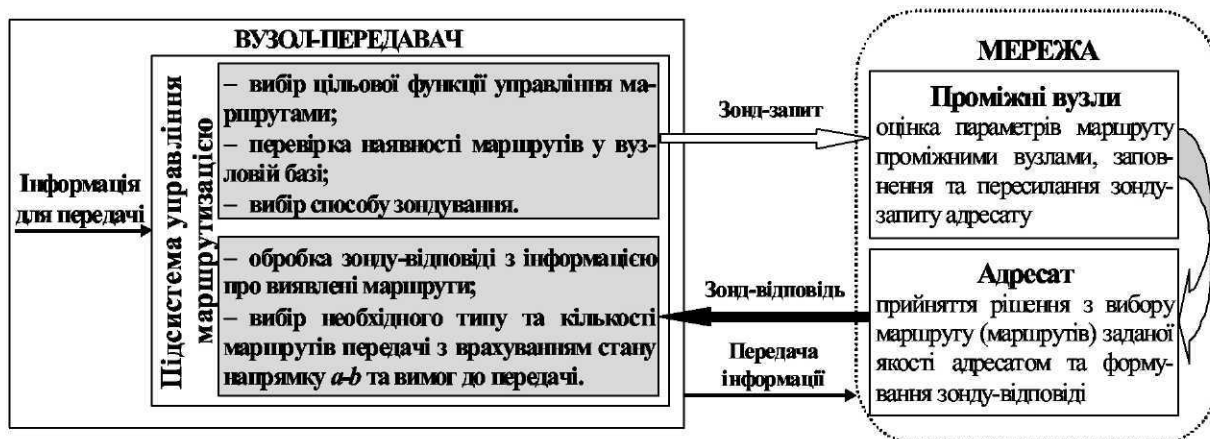


Рис. 1. Схема взаємодії вузлів мережі при зондовій маршрутизації

У разі необхідності передачі інформації вузлом-відправником відбувається звернення до підсистеми управління маршрутизацією. Перевіряється наявність маршруту у вузловій базі маршрутів. За відсутності маршруту заданої якості в базі, відправником ініціюється створення зонду-запиту, за допомогою якого буде проводитися збір інформації про стан мережі. При передачі зонду-запиту мережею, проміжними вузлами проводиться оцінка параметрів маршруту. Значення параметрів записуються у відповідні поля зонду-запиту, після чого зонд передається адресату. Адресат, отримавши зонд-запит, приймає рішення з вибору маршруту передачі інформації заданої якості і формує зонд-відповідь, який передається відправнику. Зонд-відповідь, проходячи через проміжні вузли, резервує їх ресурси з врахуванням вимог до передачі того чи іншого типу трафіка. На боці відправника, після отримання зонду-відповіді, визначається тип маршрутизації та кількість маршрутів передачі з врахуванням ситуації на інформаційному напрямку $a-b$ та вибраної цільової функції управління маршрутами.

Математична постановка задачі зондової маршрутизації

Модель мережі. Мережа представляється направленим графом $G = (V, E)$, де $V = \{v_n\}$, $n = \overline{1, N}$ – множина випадково розташованих вузлів та $E = \{e_j\}$, $j = \overline{1, J}$ – множина каналів. Кожен вузол має ідентифікаційний номер, топологія мережі визначена.

Задані:

Параметри МР: кількість вузлів $N \leq 100$; радіоканали симетричні і напівдуплексні; ємність батареї вузла $E^6(t) = \|e_i^6(t)\|$; тип інформації – $\xi = \overline{1, 3}$, де 1 – відео, 2 – мова, 3 – дані; кількість адресатів при кожній сесії $|b| = \overline{1, N-1}$ (багатокористувальницька передача); інтенсивність вхідних потоків $\Gamma_{\xi}^{a-b}(t) = \|g_{\xi}^{a-b}(t)\|$, $g_{\xi}^{a-b}(t) \leq g_{\max}^{a-b}$ на напрямку $a-b$; $\omega^{a-b}(t) \leq \omega_{\max}^{a-b}$ – інтенсивність зміни топології; пропускна спроможність напрямку $s^{a-b} \leq s_{\max}^{a-b}$; радіозв'язність між вузлами мережі підтримується одним з протоколів каналного рівня.

Множина вимог до методу маршрутизації $\{B_q\}$, $q = \overline{1, 5}$: мінімальна завантаженість мережі службовою інформацією; можливість одночасного використання кількох метрик пошуку маршруту; можливість побудови групових маршрутів; можливість передачі інформації кількома маршрутами; отримання маршруту в разі необхідності; забезпечення заданої якості обслуговування трафіка ξ -типу ($s_3^{\xi} \geq s_{\text{доп}}^{\xi}$, $t_3^{\xi} \leq t_{3, \text{доп}}^{\xi}$).

Необхідно:

1. Здійснити синтез методу маршрутизації, який забезпечить побудову маршрутів заданої якості U_M на інформаційному напрямку між відправником a та адресатом b при задоволенні користувальницької оптимізації (1):

$$U_M^{a-b*}(t) = \arg \max_{U_M(t) \in \Omega} \min C^{a-b}(X^{a-b}(t), U_M^{a-b}(t)); \quad (1)$$

$$C^{a-b} = \{S^{a-b}(X), t_3^{a-b}(X), p^{a-b}(X), E_6^{a-b}(X)\}; \quad (2)$$

$$X(t) = \{\xi^{a-b}(t), e_6^{a-b}(t), \Gamma_{\xi}^{a-b}(t), \omega^{a-b}(t), O^{a-b}(t), B^{a-b}(t), b^{a-b}(t)\}; \quad (3)$$

при виконанні обмежень на ресурс та вимог до якості обслуговування ξ -го типу трафіка

$$\Omega = \{p_{ij} \leq p_{ij \max}, s_{ij} \leq s_{ij \max}, t_3^{\xi} \leq t_{3 \max}^{\xi}, \omega^{a-b} \leq \omega_{\max}^{a-b}, e_{6i} \leq e_{6 \max}\},$$

та виконанні умов системної оптимізації $U^*(t) = \{U_M(t)\}$

$$U^*(t) = \arg \min_{U(t) \in \Omega} V_{\text{ст}}(X, U_M^*(t)), \quad (4)$$

де C^{a-b} – ціль управління мережею на напрямку $a-b$, що визначається параметрами стану маршруту $X^{a-b} = \{x_i(t)\}$, $i = \overline{1, I}$; $U_M^{a-b}(t)$ – вплив ММ; S^{a-b} – пропускна спроможність; t_3^{a-b} – середній час затримки передачі пакетів; p^{a-b} – потужність передачі; $\omega^{a-b}(t)$ – інтенсивність зміни топології на напрямку $a-b$; $\Gamma_{\xi}^{a-b}(t)$ – вхідне навантаження на напрямку $a-b$; e_{6i} – ємність батарей i -го вузла; s_{ij} – пропускна здатність каналу ij ; p_{ij} – потужність передачі в каналі ij ; t_3^{ξ} – час затримки передачі пакетів ξ -типу, $V_{\text{ст}}$ – об'єми службового трафіка; $O^{a-b}(t)$ – об'єм інформації; $B^{a-b}(t)$ – вимоги до безпеки інформації; $b^{a-b}(t)$ – кількість адресатів. З метою спрощення позначень, змінні у виразі (3) запишемо у вигляді $X = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7\}$, де $x_1 - x_7$ – параметри стану інформаційного напрямку.

Як видно з виразу (2), в ході функціонування МР може виникати декілька цілей (критеріїв) управління мережею, при чому всі вони мають різну фізичну природу, а також частина з них повинна мінімізуватися (t_3, P), а інші (S, E_6) – максимізуватися. Це породжує задачу багатокритеріальної (векторної) оптимізації процесу функціонування МР, причому сама мережа виступає в якості динамічної системи зі змінними критеріями якості [15].

Існує велика кількість методів вирішення задач багатокритеріальної оптимізації, які детальніше розглянуті в [15 – 17]. Враховуючи, що вимоги до обслуговування різних типів трафіка відмінні і можуть змінюватися навіть в ході передачі інформації, а ситуація в мережі

вимагатиме управління системою пошуку маршруту за тими критеріями, які в даний момент часу мають найбільше значення, то одним з можливих шляхів вирішення даного завдання є пошук компромісних рішень методом послідовних уступок, який полягає у впорядкуванні (ранжируванні) критеріїв за їх важливістю. Крім того, з врахуванням зазначеного, пропонується проводити динамічне ранжирування критеріїв (5) з метою забезпечення заданої якості обслуговування трафіка ξ -типу в різних умовах функціонування МР.

Нехай перевага критеріїв має наступний вигляд:

$$C_1^{a-b}(X) \succ C_2^{a-b}(X) \succ \dots \succ C_k^{a-b}(X), \quad k = \overline{1, 4}. \quad (5)$$

Тоді вирішується задача максимізації (мінімізації) одного критерію $C_1^{a-b}(X)$:

$$C_1^{a-b}(X) \rightarrow \max,$$

а знайдене максимальне значення критерію позначимо як $\max C_1^{a-b}(X)$. Виходячи з вимог до якості обслуговування певного типу трафіка і прийнятої точності, призначасмо деяку уступку Δ_1 для першого критерію, яку можна допустити, щоб оптимізувати критерій $C_2^{a-b}(X)$. Тобто вирішується задача математичного програмування:

$$C_2^{a-b}(X) \rightarrow \max;$$

$$C_1^{a-b}(X) \geq \max C_1^{a-b}(X) - \Delta_1.$$

Далі визначається уступка Δ_2 і вирішується задача:

$$C_3^{a-b}(X) \rightarrow \max;$$

$$C_1^{a-b}(X) \geq \max C_1^{a-b}(X) - \Delta_1;$$

$$C_2^{a-b}(X) \geq \max C_2^{a-b}(X) - \Delta_2,$$

і, відповідно,

$$C_4^{a-b}(X) \rightarrow \max;$$

$$C_1^{a-b}(X) \geq \max C_1^{a-b}(X) - \Delta_1;$$

$$C_2^{a-b}(X) \geq \max C_2^{a-b}(X) - \Delta_2;$$

$$C_3^{a-b}(X) \geq \max C_3^{a-b}(X) - \Delta_3.$$

Через динамічну поведінку МР, складність формування повної системи показників їх функціонування, неповноту й невірність контрольної інформації про стан інформаційного напрямку, пропонується приймати рішення з вибору цільової функції управління мережею з допомогою нечіткого контролера (рис. 2), який для їхнього прийняття використовує апарат нечіткої логіки [18].

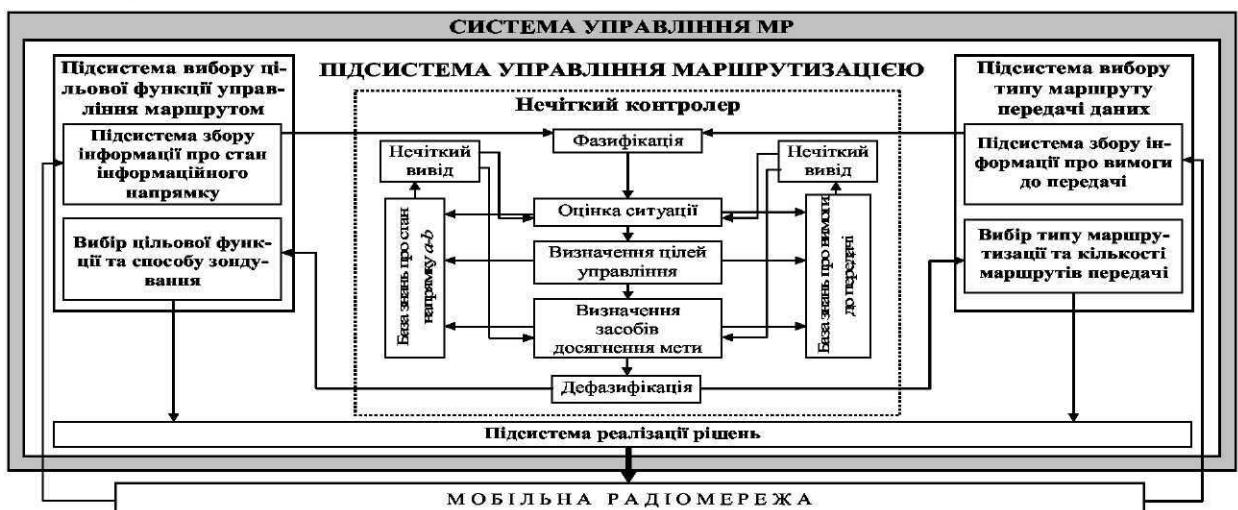


Рис. 2. Нечіткий контролер у підсистемі управління маршрутизацією

Контролер використовує нечіткий опис керованого процесу та системи його управління (у вигляді нечіткої бази знань), а також перетворює нечіткий опис у послідовність команд для досягнення цілей управління маршрутизацією.

Етапи функціонування НІММ

Новий інтелектуальний метод маршрутизації передбачає два основні етапи: побудова маршрутів та їх підтримання.

Етап побудови маршрутів. На даному етапі вузол виконує дві основні функції: пошук маршрутів (що відповідають вимогам до передачі ξ -того типу трафіка) серед наявних в базі маршрутів; у разі відсутності маршруту заданої якості вибирає спосіб побудови нового маршруту. Схема алгоритму пошуку маршруту заданої якості відправником зображена на (рис. 3).

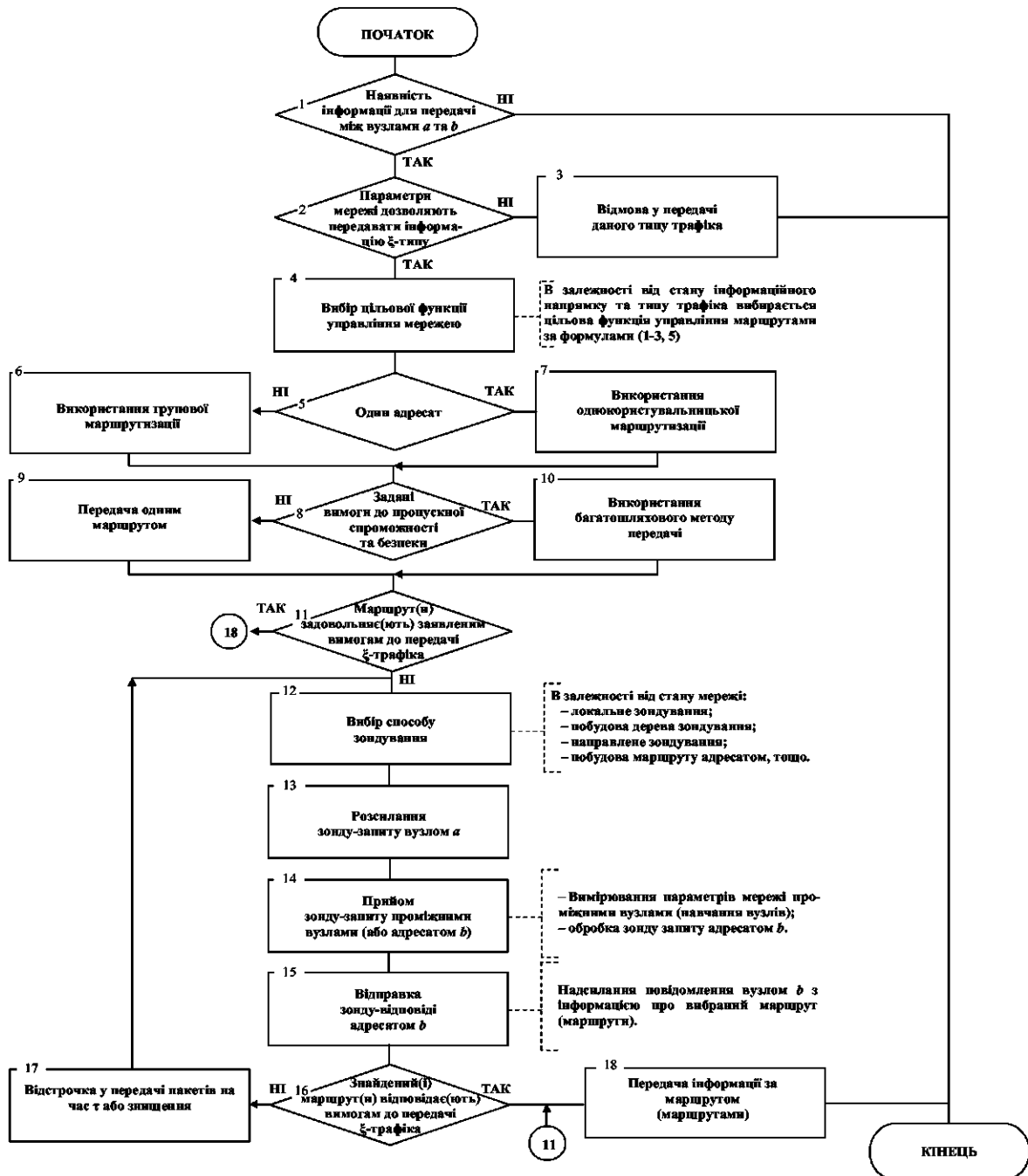


Рис. 3. Схема алгоритму пошуку маршруту на боці відправника

У запропонованому підході етап побудови маршруту включає підетапи вибору цільової функції управління маршрутами (багатопараметрична маршрутизація), способу зондування

(локальне зондування, випереджаюча побудова нового маршруту, побудова маршрутів адресатом та ін.), вибору кількості маршрутів (одномаршрутна та багатомаршрутна передача) і типу маршрутизації (групова чи однокористувальницька).

У разі необхідності передачі інформації від вузла a до вузла b , вузлом a ініціюється запит до підсистеми управління маршрутизацією (блок 2), з метою перевірки відповідності параметрів мережі вимогам трафіка, що передається. Запит обробляється підсистемою збору інформації про стан інформаційного напрямку. Відбувається вибір цільової функції y_1 , яка визначатиметься з врахуванням стану інформаційного напрямку та вимог до передачі трафіка ξ -типу (блок 4) (рис. 4а). Далі проводиться пошук маршрутів серед наявних в базі маршрутів з врахуванням вимог до передачі трафіка ξ -типу (кількість адресатів, вимоги до пропускної спроможності та безпеки передачі інформації). Приймається рішення про тип маршрутизації та кількість маршрутів (боки 5–11). У випадку, коли маршрут з необхідними параметрами міститься в базі знань, він використовується для передачі повідомлень до адресата b (блок 18).

У разі, відсутності такого маршруту відправник a розпочинає пошук нового маршруту шляхом розсилання всім вузлам мережі зонду-запиту (блоки 12, 13). Зонд-запит включає ідентифікатори відправника та адресата, вимоги до маршруту у вигляді необхідних параметрів (метрик вибору маршруту).

На стороні приймача проводиться обробка зонду-запиту, прийняття рішення про стан інформаційного напрямку $a-b$ та формування зонду-відповіді (рис. 4б). Передбачається, що інформація про тип трафіка та його об'єм отримується із заголовків повідомлень, які надходять з прикладного рівня моделі OSI.

Відправник, отримавши зонд-відповідь приймає рішення з вибору типу маршрутизації та кількості маршрутів (рис. 4б).

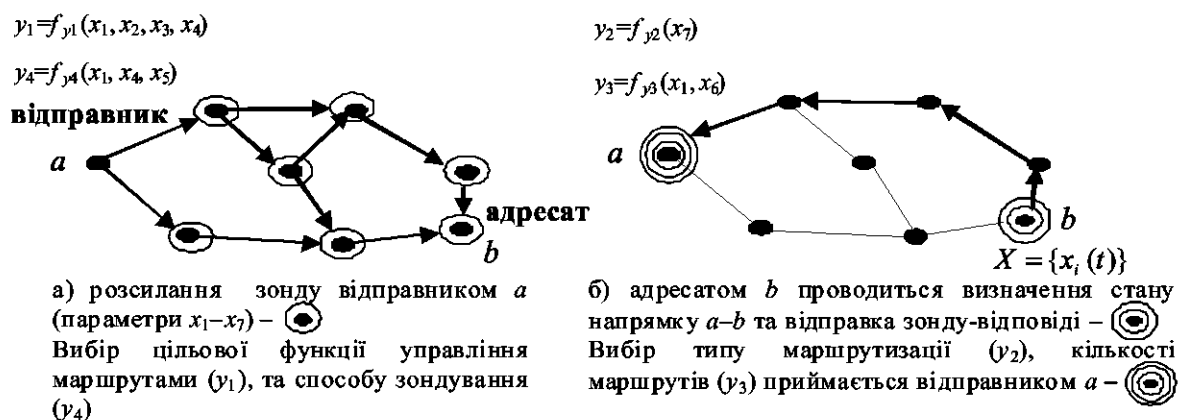


Рис. 4. Етап побудови нового маршруту

При функціонуванні мережі через кожен вузол буде проходити значна кількість зондів та інформаційних пакетів, що дозволить вузлам записувати в пам'ять нові маршрути, коригувати старі та використовувати їх в ході подальшого функціонування.

Якщо знайдені маршрути (блок 16) відповідають вимогам до передачі трафіка ξ -типу, то відправник a передає інформацію, в іншому випадку відбувається відстрочка передачі пакетів на деякий проміжок часу τ , після чого процес пошуку маршруту повторюється (блок 17).

На відміну від більшості ММ, які використовуються в провідних мережах і враховують тільки один параметр при визначенні найкоротшого маршруту, запропонований метод використовує множину метрик пошуку маршруту в залежності від цільової функції управління маршрутами, вимог до якості маршрутів і ситуації, яка склалася в мережі.

Етап підтримання маршрутів. Проміжний вузол k виявивши відмову радіоканалу (який є складовою частиною активного маршруту для вузла a), надсилає зонд-відмову вузлам a та b . При отриманні відправником a чи адресатом b зонду-відмови вони ініціюють

процес створення нового маршруту. Відбувається вибір способу зондування y_4 на основі параметрів x_1, x_4, x_5 та прогнозованого часу існування каналу t_{a-b}^{ic} (рис. 4а). Основною умовою прийняття рішення про побудову нового маршруту є нерівність $t_{a-b}^{ic} \leq t_{pd}$, де t_{pd} – час передачі даних в межах однієї сесії. В залежності від ситуації, що склалася в мережі, використовуються різні способи зондування. З метою обмеження кількості зондів, які розсилаються в мережі, застосовується локальне зондування, яке передбачає розсилання зондів в обмеженій зоні мережі та побудову дерева зондування. Однак ці способи можуть збільшити час побудови маршруту при значній відстані до адресата.

У випадку, коли при передачі певного типу інформації критичним параметром є величина часу затримки t_3 , можливим рішенням в даній ситуації є побудова нового маршруту адресатом та використання направленої зондування. Схема алгоритму підтримання маршруту заданої якості зображена на (рис. 5).

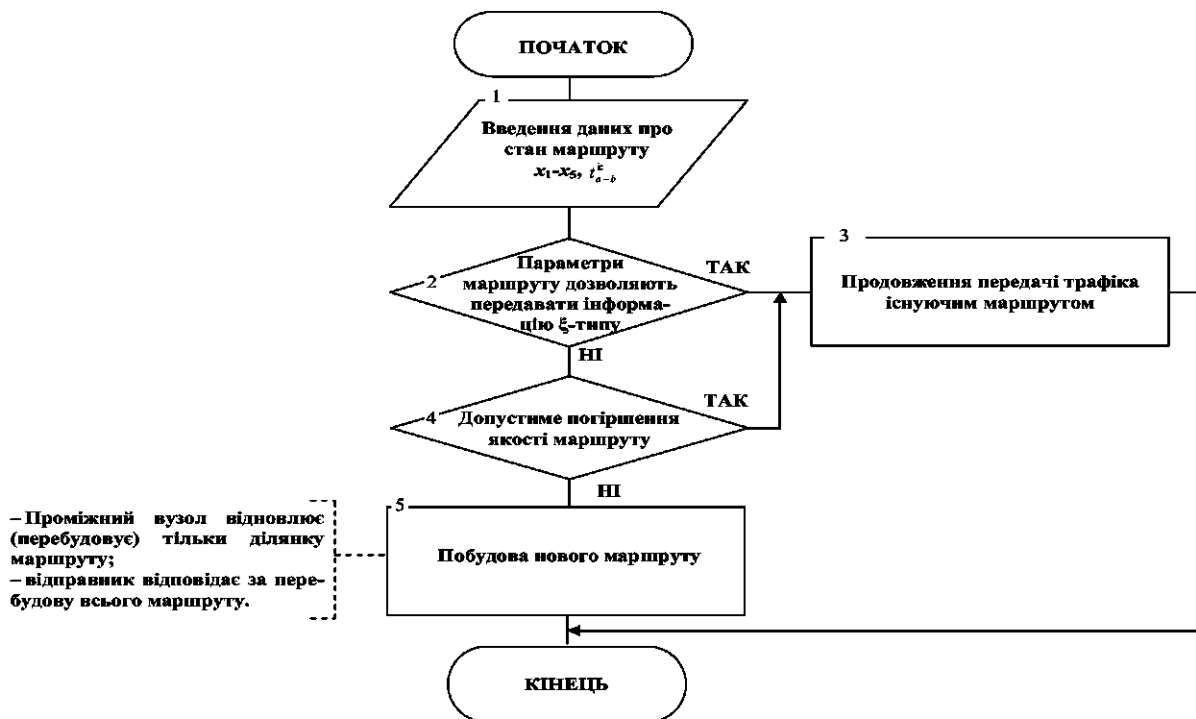


Рис. 5. Схема алгоритму підтримання маршруту

Математична модель інтелектуальної системи пошуку маршруту. Кожен канал $e = (v_l, v_r) \in E$ і будь-який вузол $v_i \in V$ на момент часу t може характеризуватися вектором параметрів $X = \langle x_i \rangle, i = \overline{1, 7}$ – вектор фіксованих значень змінних, що поступають на вхід нечіткого контролера вузла $v_i \in V$ [16, 17]. Користувальницька (вузлова) оптимізація буде досягнута шляхом вибору цільової функції управління маршрутами, типу маршрутизації, кількості маршрутів та способу зондування. Вираз (1) перепишемо в наступному вигляді:

$$U_M(t) = \{y_1, y_2, y_3, y_4\},$$

$$y_1 = f_{y_1} \{x_1, x_2, x_3\}, \quad (6)$$

$$y_2 = f_{y_2} \{x_1, x_4, x_5\}, \quad (7)$$

$$y_3 = f_{y_3} \{x_7\}, \quad (8)$$

$$y_4 = f_{y_4} \{x_1, x_6\}, \quad (9)$$

де $U_M(t)$ – рішення з вибору маршруту; y_1 – вибір цільової функції управління маршрутами; y_2 – вибір типу маршрутизації; y_3 – вибір кількості маршрутів; y_4 – вибір способу зондування; x_1 – тип трафіка, x_2 – об’єм інформації, x_3 – залишкова ємність батарей, x_4 – інтенсивність

потоків ξ -типу (розмір черг в проміжних вузлах), x_5 – мобільність мережі, x_6 – забезпечення безпеки інформації, x_7 – кількість адресатів.

Ієрархію процесу прийняття рішень підсистемою управління маршрутизацією з пошуку маршруту заданої якості зображено на (рис. 6). Кожен вузол здійснює цикл управління, який складається з етапів: збір даних про стан вузла та стан напрямку зв'язку; аналіз та ідентифікація поточної ситуації у вузлі-передавачі та мережі; прийняття керуючих рішень та їх реалізація з метою вибору тієї цільової функції управління мережею, яка найточніше відповідатиме вимогам до передачі того чи іншого типу трафіка та стану інформаційного напрямку $a-b$.



Рис. 6. Ієрархія процесу прийняття рішень з пошуку маршруту заданої якості

Аналіз та ідентифікація стану напрямку $a-b$ та вимог до передачі у вузлах полягає в побудові математичної моделі, яка встановлює зв'язок між вхідними (x_1-x_7) та вихідними змінними (y_1-y_4) за експериментальними даними. При ідентифікації складних об'єктів та процесів, до яких відноситься система пошуку маршруту в мережах з динамічною топологією, використання класичних методів моделювання стає неможливим, через необхідність використання результатів натурних експериментів або статистичних даних. Крім того, система управління мобільною мережею повинна володіти властивостями „самонавчання” (здатність послідовно мінімізувати відхилення фактичного результату діяльності від деякого бажаного еталону) та лінгвістичності (здатність виражати природною мовою знання, отримані в результаті навчання). Математичним апаратом, який на відміну від класичних методів, враховує ці властивості є теорія нечітких множин, яка має засоби формалізації натурно-мовних висловлювань та логічного виводу [16, 17].

Модель системи вибору цільової функції управління, вибору типу маршрутизації, кількості маршрутів та способу розсилання зонду будуватиметься шляхом проектування та налаштування нечітких баз знань, які являють собою сукупність лінгвістичних висловлювань типу:

$$R^i: \text{ЯКШО } x_1 \text{ рівний } F_1^i \text{ та ... та } x_n \text{ рівний } F_n^i, \text{ ТО } y \text{ рівний } G^i,$$

де x_1, \dots, x_n y – відповідно вхідні та вихідні лінгвістичні змінні, а F_j^i, G^i – нечіткі множини. Основна ідея полягає в тому, що налаштування нечіткої бази знань можна ідентифікувати нелінійні залежності з необхідною точністю.

В загальному випадку алгоритми поведінки, що реалізуються інтелектуальною системою управління, повністю визначаються наявною базою знань.

Побудова нечіткої бази знань. Нечітка база знань – це матриця, яка являє собою таблицю, сформовану за певними правилами.

Матриця знань визначає систему логічних висловлювань «ЯКЩО <умова> ТО <дія>, ПНАКШЕ...», які зв'язують значення вхідних змінних $x_1 \div x_7$ стану напрямку зв'язку з одним із можливих типів рішення y_g , ($g=1, G$). Мінімальна кількість параметрів бази знань нечіткої системи управління вибором метрики пошуку маршруту, типу маршрутизації, кількості маршрутів та способу зондування зображена в таблиці 2.

Для оцінки значень лінгвістичних змінних x_1-x_7 будемо використовувати шкалу лінгвістичних термів a_i^p , які формують базу знань. Кожен з цих термів являє собою нечітку множину, задану з допомогою відповідної функції приналежності. Як видно з таблиці 2, тільки вхідні змінні x_3-x_5 задаються нечітко, решта змінних – є чіткими значеннями параметрів, що отримуються з різних рівнів моделі OSI. Враховуючи різну природу вхідних лінгвістичних змінних, функції приналежності будуються окремо для кожної змінної. Однак, з метою забезпечення максимальної швидкості виконання математичних операцій малопотужними процесорами мобільних вузлів, пропонується використовувати параметричні, нормальні, унімодальні, трикутні функції приналежності [16, 17].

Таблиця 2

Параметри бази знань нечіткої системи управління

Змінні	Значення змінних	Примітка
1	2	3
Вхідні змінні		
x_1 – тип трафіка, що передається	a_1^1 – відео; a_1^2 – мова; a_1^3 – дані	Чіткі попередньо запрограмовані значення величин
x_2 – об'єм інформації	a_2^1 – високий; a_2^2 – середній; a_2^3 – низький	Чіткі значення величин, що отримуються з прикладного рівня
x_3 – залишкова ємність батарей	a_3^1 – висока; a_3^2 – середня; a_3^3 – низька	Дані про параметри отримуються з фізичного, каналного та транспортного рівнів моделі OSI, потрапляють на вхід фазифікатора і перетворюються на нечіткі величини
x_4 – розмір черг в проміжних вузлах	a_4^1 – високий; a_4^2 – середній; a_4^3 – низький	
x_5 – мобільність мережі	a_5^1 – висока; a_5^2 – середня; a_5^3 – низька	
x_6 – забезпечення безпеки інформації	a_6^1 – так; a_6^2 – ні;	Чіткі попередньо запрограмовані значення величин
x_7 – кількість адресатів	a_7^1 – один; a_7^2 – багато;	Чіткі значення величин, що отримуються з прикладного рівня
Вихідні змінні		
y_1 – вибір цільової функції управління мережею	$d_1^1 - S^{a-b}(X) \succ t_3^{a-b}(X) \succ p^{a-b}(X) \succ E_6^{a-b}(X);$ $d_1^2 - t_3^{a-b}(X) \succ S^{a-b}(X) \succ p^{a-b}(X) \succ E_6^{a-b}(X);$ $d_1^3 - p^{a-b}(X) \succ S^{a-b}(X) \succ t_3^{a-b}(X) \succ E_6^{a-b}(X);$ $d_1^4 - E_6^{a-b}(X) \succ S^{a-b}(X) \succ t_3^{a-b}(X) \succ p^{a-b}(X)$	Чіткі значення впорядкувань критеріїв, за якими буде проводитися оцінка стану інформаційного напрямку
y_2 – тип маршрутизації	d_2^1 – однокористувальницька; d_2^2 – групова	Чіткі значення типу маршрутизації
y_3 – кількість маршрутів	d_3^1 – один; d_3^2 – декілька	Чіткі значення кількості маршрутів
y_4 – спосіб розсилки зонду-запиту	d_4^1 – локальне зондування d_4^2 – побудова дерева зондування d_4^3 – направлене зондування d_4^4 – побудова маршруту адресатом	В залежності від ситуації, що склалася на інформаційному напрямку, використовуються різні способи зондування

Користуючись введеними якісними термами та знаннями експертів, представимо співвідношення 6, 7, 8, 9 у вигляді таблиць 3–6.

Для проведення розрахунків таблиці 3–6 переписуються у вигляді нечітких рівнянь, компактний запис яких має вигляд [17]:

$$\mu^{d_j}(x_1, x_2, \dots, x_I) = \bigvee_{p=1}^{k_j} \left[\bigwedge_{i=1}^I \mu^{a_i^{jp}}(x_i) \right], \quad i=\overline{1, I}, j=\overline{1, J}.$$

де $\mu^{a_i^{jp}}$ – функція приналежності значення вхідної змінної x_i терму a_i^p ; a_i^{jp} – лінгвістична оцінка вхідної змінної x_i . Кількість нечітких рівнянь відповідає кількості рядків у таблицях.

Перетворення системи логічних висловлювань (таблиці 3-6) у логічні рівняння полягає в представленні вхідних і вихідної змінної у вигляді нечітких множин. Лінгвістичні оцінки a_i^{jp} змінних $x_1 \div x_I$, що входять в логічні висловлювання про рішення d_j , розглядаються як нечіткі числа, що визначаються на універсальних множинах $X_i = [x_i, \bar{x}_i]$, $i=\overline{1, I}, j=\overline{1, J}$.

Тобто здійснюється заміна: лінгвістичних оцінок a_i^{jp} на функції приналежності $\mu^{a_i^{jp}}(x_i)$, $i=\overline{1, I}, j=\overline{1, J}$; $\mu^{d_j}(x_1, x_2, \dots, x_I)$ – залежана від I змінних функція приналежності вектора вхідних змінних $X = (x_1, x_2, \dots, x_I)$ значенню вихідної змінної $y=d_j$, $i=\overline{1, I}, j=\overline{1, J}$.

Таблиця 3

Знання про співвідношення (6)

x_1	x_2	x_3	x_4	y_1
a_1^1	a_2^1	a_3^1	a_4^3	d_1^1
a_1^1	a_2^1	a_3^1	a_3^2	
a_1^1	a_2^1	a_3^1	a_3^1	
a_1^1	a_2^1	a_3^2	a_4^3	
a_1^1	a_2^1	a_3^2	a_4^2	
a_1^1	a_2^1	a_3^2	a_4^1	
a_1^1	a_2^2	a_3^1	a_4^3	
a_1^1	a_2^2	a_3^1	a_4^2	
a_1^1	a_2^3	a_3^1	a_4^3	
a_1^3	a_2^1	a_3^1	a_4^3	
a_1^3	a_2^1	a_3^2	a_4^2	
a_1^3	a_2^2	a_3^1	a_4^1	
a_1^2	a_2^1	a_3^1	a_4^1	
a_1^2	a_2^1	a_3^1	a_4^3	d_1^2
a_1^2	a_2^1	a_3^1	a_4^2	
a_1^2	a_2^1	a_3^2	a_4^3	
a_1^2	a_2^2	a_3^1	a_4^3	
a_1^2	a_2^2	a_3^1	a_4^2	
a_1^1	a_2^1	a_3^2	a_4^1	d_1^3
a_1^2	a_2^1	a_3^2	a_4^1	
a_1^3	a_2^1	a_3^2	a_4^1	
a_1^1	a_2^1	a_3^3	a_4^3	d_1^4
a_1^2	a_2^1	a_3^3	a_4^3	
a_1^3	a_2^1	a_3^3	a_4^3	

Таблиця 4

Знання про співвідношення (7)

x_7	y_2
a_7^1	d_2^1
a_7^2	d_2^2

Таблиця 5

Знання про співвідношення (8)

x_1	x_6	y_3
a_1^1	a_6^1	d_3^1
a_1^2	a_6^1	
a_1^3	a_6^1	
a_1^1	a_6^2	d_3^2
a_1^2	a_6^2	
a_1^3	a_6^2	

Таблиця 6

Знання про співвідношення (9)

x_1	x_4	x_5	y_4
a_1^1	a_4^1	a_5^1	d_4^1
a_1^1	a_4^2	a_5^2	
a_1^2	a_4^1	a_5^1	
a_1^2	a_4^2	a_5^2	
a_1^3	a_4^1	a_5^1	
a_1^3	a_4^2	a_5^2	
a_1^1	a_4^3	a_5^3	d_4^2
a_1^2	a_4^3	a_5^3	
a_1^3	a_4^3	a_5^3	

Обчислення значень вихідних змінних y_1 – y_4 проводиться з використанням алгоритму ідентифікації об'єкта з дискретним входом, який детально описаний в [17].

Висновки

В статті запропоновано новий інтелектуальний метод маршрутизації для мереж з динамічною топологією. На відміну від існуючих методів зондової маршрутизації, розроблений НІММ передбачає:

- введення додаткових функцій маршрутизації, які будуть реалізовані поетапно: вибір цільової функції управління маршрутами (побудова маршруту мінімальної (заданої) вартості за вибраними метриками), типу маршрутизації, кількості маршрутів та способу зондування в мережі;

- інтелектуалізацію процесу прийняття рішень з вибору маршрутів передачі даних на основі використання апарата нечіткої логіки;

- прийняття рішення про вибір маршрутів, на відміну від існуючих методів, проводиться з врахуванням стану інформаційного напрямку та вимог до передачі різних типів трафіка.

Оцінка ефективності НІММ за локальними показниками (часова складність, алгоритмічна складність, зв'язна складність) показала, що вигоди розробленого методу незначні. В ході подальших досліджень буде проведено налаштування системи логічних рівнянь, а також побудовано імітаційну модель МР для оцінки розробленого НІММ, в порівнянні з існуючими зондовими ММ, за глобальними показниками – час доставки пакетів, ширина смуги пропускання та об'єм службового трафіка.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Романюк В.А.* Мережі MANET – основа побудови тактичних мереж зв'язку // IV Науково-практичний семінар ВІТІ „Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення”. – К.: ВІТІ НТУУ “КПІ”. – 2007. – С. 15 – 28.
2. *Минович А.И., Романюк В.А.* Маршрутизация в мобильных радиосетях – проблема и пути решения // Зв'язок. – 2006. – № 7. – С. 49 – 55.
3. *Novatnack J., Greenwald L., Arora H.* Evaluating Ad hoc Routing Protocols with Respect to Quality of Service // In Proceedings of WIMOB, 2005.
4. *Hanzo L., Tafazolli R.* A Survey of QoS Routing Solutions for Mobile Ad hoc Networks, in IEEE Communications Surveys and Tutorials, Vol. 9, no. 2, pp. 50-70, 2nd Quarter 2007.
5. *Zhang B., Mouftah H. T.* QoS routing for wireless ad hoc networks: problems, algorithms and protocols. IEEE Commun. Mag., vol. 43, pp. 110-117, Oct. 2005.
6. *Perkins C., Belding-Royer E. Das S.* AODV Ad Hoc On-Demand Distance Vector Routing, IETF, The Internet Engineering Task Force, RFC 3561, July 2003.
7. *Haenggi M.* Routing in ad hoc networks –A wireless perspective, IEEE Proc. First Int'l Conf. Broadband Networks, 2004.
8. *Murthy C., Manoj B.* Ad Hoc Wireless Networks: Architectures and Protocols. Prentice Hall: Upper Saddle River, NJ. 2004.
9. *Олифер В.Г., Олифер Н.А.* Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы. – СПб: Питер, 2000. – 672 с.
10. *Минович А.И., Романюк В.А.* Імітаційне моделювання методів маршрутизації, які застосовуються в автоматизованих мережах радіозв'язку // Збірник наукових праць № 1. – К.: КВІУЗ. – 2001. – С. 95–102.
11. *Романюк В.А.* Активная маршрутизация в мобильных радиосетях // Зв'язок. – 2002. – № 3. – С. 21 – 25.
12. *Минович А.И., Романюк В.А.* Управление топологией мобильной радиосети // Зв'язок. – 2003. – № 2. – С. 28 – 33.
13. *Минович А.И., Романюк В.А.* Методология оперативного управления мобильными радиосетями // Зв'язок. – 2005. – № 2. – С. 53 – 58.
14. *Минович А.И., Романюк В.А., Скрытний Л.В.* Способы повышения эффективности функционирования зондовой маршрутизации в мобильных радиосетях // Зв'язок. – 2003. – № 6. – С. 46 – 49.
15. *Многокритериальный синтез динамических систем / Воронин А.Н.; Отв. Ред. Павлов В.В.; АН Украины. Ин-т кибернетики им. В.М. Глушкова.* – Киев: Наук. думка, 1992. – 160 с.
16. *Герасимов Б.М., Дивизиюк М.М., Субач И.Ю.* Системы поддержки принятия решений: проектирование, применение, оценка эффективности [монография]. – Севастополь: НИЦ ВСУ, 2004. – 320 с.
17. *Герасимов Б.М., Грабовский Г.Г., Рюмилин Н.А.* Нечеткие множества в задачах проектирования, управления и обработки информации. – К.: Техника, 2002, – 140 с.
18. *Сова О.Я.* Метод багатопараметричної зондової маршрутизації в мережах MANET з використанням нечіткої логіки // Збірник наукових праць ВІТІ НТУУ “КПІ”. – 2007. – № 3. – С. 125 – 136.