

SECTION 7. INFORMATION TECHNOLOGIES

7.1 Методологічні засади маршрутизації в мережах спеціального зв'язку

Вступ

Системи підтримки прийняття рішень (СППР) активно використовуються в усіх сферах життєдіяльності людей. Створення інтелектуальних СППР стало природним продовженням широкого застосування СППР класичного типу. Інтелектуальні СППР знайшли широке використання для вирішення специфічних завдань військового призначення, а саме [278, 279]:

- планування розгортання, експлуатації систем зв'язку та передачі даних;
- автоматизація управління військами та зброєю;
- збір, обробка та узагальнення даних та інші.

В зазначеній роботі ми обмежимося лише вузьким питанням, а саме питанням вибору раціонального маршруту передачі інформації в СППР мереж спеціального радіозв'язку в умовах дестабілізуючих впливів.

Проведений аналіз праць [278, 280–287] показав, що при передачі інформації між вузлами мереж спеціального радіозв'язку виникає ряд проблемних питань, а саме:

1. Передачі інформації відбувається в складній радіоелектронній обстановці на фоні навмисних та природніх завад.
2. Елементи системи радіозв'язку є об'єктами першочергового вогневого ураження за рахунок високої радіопомітності для засобів радіорозвідки.
3. Висока динамічність зміни радіоелектронної обстановки в ході воєнного конфлікту.
4. Висока швидкоплинність ведення бойових дій (операцій).
5. Обмеженість енергетичного ресурсу батарей засобів радіозв'язку.
6. Наявність кібернетичних атак на елементи систем радіозв'язку.

Ці обставини обумовлюють пошуку нових наукових підходів та технологічних рішень, що дозволять:

- забезпечити гарантовану доставку повідомлень між вузлами радіомережі з заданою якістю;
- побудувати альтернативні маршрути передачі інформації в ході подавлення;
- врахувати вплив навмисних та природніх завад при передачі повідомлень між абонентами радіомережі;
- врахувати вплив засобів вогневого ураження та кібернетичних атак на систему радіозв'язку.

Для досягнення мети встановлюється така ціль:

- здійснити математичну постановку завдання маршрутизації в мережах радіозв'язку спеціального призначення;
- провести розробку методу маршрутизації в мережах радіозв'язку спеціального призначення;
- провести оцінку ефективності запропонованого методу.

7.1.2 Матеріали та методи дослідження

В ході проведеного дослідження використовувалися еволюційні алгоритми та штучні нейронні мережи, що еволюціонують – для вирішення задачі аналізу радіоелектронної обстановки, вибору раціонального маршруту передачі інформації та корегування баз знань. В зазначеному дослідженні також використаний розроблений в попередніх роботах метод навчання штучних нейронних мереж, який дозволяє проводити глибоке навчання штучних нейронних мереж. Сутність глибокого навчання полягає в навчанні архітектури, виду та параметрів функції належності. Також в зазначеному дослідженні використані методи багатовимірною опису радіоелектронної обстановки, що розроблені авторами раніше. Моделювання проводилося з використанням програмного забезпечення MathCad 2014 та ПЕОМ Intel Core i3.

7.1.3 Математична постановка завдання передачі інформації в умовах впливу дестабілізуючих впливів на систему радіозв'язку

Для опису математичної моделі мережі радіозв'язку спеціального призначення введемо необхідні позначення. Нехай $N = \{1, 2, \dots, n\}$ – вузли радіомережі спеціального призначення. Для вузла з номером i будемо рахувати відомим (прогнозованим) час затримки передачі інформації на вузлі радіомережі $r_i(t)$ на момент часу $t = 1, 2, \dots, T$, який відповідає конкретному часовому проміжку часу затримки передачі інформації. Затримка обумовлена впливом дестабілізуючих факторів (вогневого ураження вузлів мережі, кібернетичними атаками та радіоелектронним подавленням).

Значення часу затримки передачі інформації на конкретному вузлі радіомережі спеціального призначення обчислюються безпосередньо шляхом аналізу наявної статистичної інформації та інш. Крім того, вважатимемо, що відомі межі $z_{i \min}$ та $z_{i \max}$ гранично допустимого часу затримки передачі інформації на конкретному вузлі радіомережі спеціального призначення та межі a_i та b_i можливого зниження та збільшення цього часу протягом одиниці виміру в процентах від загального часу. Позначимо планове знаходження пакету повідомлення на вузлі i на момент часу t через $z_i(t)$, який повинен відповідати умовам:

$$z_i^{\min} < a_i z_i(t) < z_i(t+1) < b_i z_i(t) < z_i^{\max}. \quad (1)$$

Позначимо через $x_{ij}(t)$ максимально допустимий обсяг інформації, що передається з вузла i у вузол j на момент часу t через радіомережу з обмеженнями на пропускну здатність каналів радіозв'язку пропускну здатністю радіоліній:

$$0 < x_{ij}(t) < x_{ij}^{\max}, \quad (2)$$

Вважатимемо, що на вузол i радіомережі на момент часу t припадає вплив певної частини дестабілізуючих чинників обсягом $y_i(t)$, що впливає на оперативність циркуляції інформації в радіомережі. Тоді прогнозований час затримки передачі інформації в вузлі радіомережі повинен відповідати вимогам:

$$z_i(t) + \sum_j k_{ji} x_{ji}(t) - \sum_j x_{ji}(t) = r_i(t) + y_i(t), z_i(T+1) = z_i. \quad (3)$$

В умовах (3) коефіцієнти k_{ji} визначають відсоток зниження оперативності передачі інформації на радіолінії $i-j$. Остання рівність відповідає періодичним (циклічним) процесам з довжиною періоду T , $T = (\tau_c, \tau_n)$, де тривалість повідомлень – τ_c , пауз після них – τ_n .

Як критерій ефективності системи радіозв'язку спеціального призначення можна прийняти сумарні часові затримки, пов'язані з передачею інформації з вузла l у вузол z за період спостереження в умовах впливу дестабілізуючих чинників:

$$t(1,z) < T, S(1,z) \rightarrow \min, \quad (4)$$

де t – функція часу на маршруті $1-z$; S – сумарний час затримки передачі інформації на маршруті.

Запропонована в дослідженні динамічна модель у вигляді (1)–(4) відповідає задачі оптимізації маршруті передачі інформації в радіомережі. Це завдання можна віднести і до різновидів динамічних завдань маршрутизації з періодичним значеннями вершин і вузлів, що змінюються в результаті впливу дестабілізуючих чинників.

Враховуючи зазначене, то необхідно провести створення методів (методик) маршрутизації, що повинні задовольняти наступному комплексу вимог:

- можливість агрегування різнорідних показників (як кількісних, так і якісних) оцінки та вибору рішень, що розрізняються по вимірювальним шкалами та діапазонами значень;
- врахування сумісності і різної значимості часткових показників в узагальненій оцінці рішень;
- гнучке налаштування (адаптація) оціночних моделей при додаванні (виключенні) показників і зміні їх параметрів (сумісності та значущості показників);
- висока оперативність прийняття рішень в умовах невизначеності.

Розробка методу маршрутизації в мережах радіозв'язку спеціального призначення

Метод маршрутизації в мережах радіозв'язку спеціального призначення на основі мурашиного алгоритму складається з наступної послідовності дій:

Дія 1. Ініціалізація. На даному етапі система радіозв'язку представляється в вигляді направленого графу. Ініціалізації складається з початкових значень параметрів алгоритму, таких як кількість мурах, коефіцієнт випаровування феромону, швидкість передачі інформації, заряд батареї, час передачі пакету, надійність передачі пакету та час затримки передачі інформації. В час затримки враховується вплив дестабілізуючих чинників. На даному етапі також враховується тип невизначеності про радіоелектронну обстановку та сукупність дестабілізуючих чинників на підставі доступних розвідувальних відомостей.

Дія 2. Початкове виставлення мурах. На цьому етапі мурахи розташовуються на початкових точках з яких відбуватиметься ітерація. Активний мурашка відноситься до мурашки, який ще не прибув до місця призначення і не заблокований на вершинах (вузлах). Оскільки кожен мураха може проходити кожен вузол один раз в кожній ітерації, мураха блокується в місці з'єднання, коли він не має шансів продовжити свій перехід до пункту призначення і не має можливого шляху для переміщення назад.

Дія 3. Побудова ймовірних маршрутів. На цьому етапі ймовірність кожного можливого прямого маршруту обчислюється на основі його функції витрат для кожної активної мурахи. Ймовірнісний перехід мурашок між вузлами також може бути заданий як правило переходу вузла. Ймовірність переходу k -ю мурахою від вузла i до вузла j задається:

$$P_{ij}^k = \begin{cases} \frac{(\tau_{ij})^\alpha (\eta_{ij})^\beta}{\sum_{h \notin tabu_k} (\tau_{ih})^\alpha (\eta_{ih})^\beta} & j \notin tabu_k, \\ 0, & \text{в іншому випадку} \end{cases}, \quad (5)$$

де τ_{ij} та η_{ij} інтенсивність феромонів і вартість маршруту між вузлами i та j , відповідно. Відносне значення τ_{ij} та η_{ij} контролюються параметрами α та β , відповідно $tabu_k$ це список недоступних маршрутів (відвіданих вузлів) для мурахи k . Неприпустимі маршрути вираховуються відповідно до еліпсів

подавлення системи радіозв'язку засобами радіоелектронного подавлення, відділення від засобів вогневого впливу на систему радіозв'язку.

Дія 4. Вибір маршруту. Випадковий параметр $0 \leq q \leq 1$ з однаковою ймовірністю порівнюється з параметром Q , де $0 \leq Q \leq 1$. Результат порівняння між Q і q бере один з двох методів вибору активною мурахою маршрут наступного переходу таким чином:

$$j = \begin{cases} \arg \max (p_{ih}^k) & q > Q, \\ \text{Колесо рулетки} (p_{ih}^k) & \text{інакше.} \end{cases} \quad (6)$$

Якщо q більший Q , активний мураха вибирає маршрут з найбільшою ймовірністю, інакше, правило колеса рулетки вибирається для вибору наступного переходу через ймовірності.

Дія 5. Оновлення списку Таби. На цьому етапі маршрут (вибраний вузол), який мурахою k було вибрано, додано до переліку в таблиці. Це направлення не буде повторно обрано, а його ймовірність більше не обчислюється. Якщо мураха k дійшла до пункту призначення або була заблокована на вершині (вузлі), цей крок деактивує заблоковану чи прибувшу в поточній ітерації мурашу.

Дія 6. Оновлення феромону. Система феромонів в мурашиному алгоритмі складається з двох основних правил: спочатку застосовується під час побудови рішень (локальне правило оновлення феромонів), а друге правило застосовується після того, як всі мурашки закінчили побудову рішення (правило оновлення глобальної феромони). Сума феромонів маршруту між переходами i та j оновлюється для k -ї мурашки як:

$$\tau_{ij}^{new} = \tau_{ij}^{old} + (10 \times \Delta\tau) \quad (7)$$

де $\Delta\tau$ – кількість місцевого оновлення феромонів. Значенням $\Delta\tau$ є вихідна система нечіткої логіки, що розроблена авторами в роботі [278].

Вхідні данні нечіткої логіки є “швидкість передачі інформації”, “заряд батареї”, “час доставки пакету”, “надійність доставки пакету” напрямку який був обраний k -ю мурашкою, “ймовірність бітової помилки”. Розглядаючи

обчислювальні складності, для кожного входу визначаються лише чотири вхідних нечітких множини, “Low”, “Weak”, “Medium” і “High”. Для вихідної змінної розглядаються тринадцять нечітких множин. На заключному етапі, дефазифікації методів, у цій системі нечіткої логіки застосовується метод “центру тяжіння” для вирішення одного вихідного значення з нечіткого набору. Тому напрями з більш вищими показниками дозволяють досягти більшого місцевого оновлення феромонів.

Дія 7. Глобальне оновлення феромонів. Відбувається за виразом:

$$\tau_{ij}^{new} = \rho \tau_{ij}^{old}, \quad (8)$$

де $0 \leq \rho \leq 1$ коефіцієнт випаровування і зазвичай встановлюється на 0,9.

Дія 8. Формування бази даних маршрутів. База даних маршрутів включає в себе наступні складові: кеш тимчасових маршрутів, база знань маршрутів, таблицю маршрутизації.

Кеш тимчасових маршрутів містить інформацію про маршрутизацію необхідну для вузла. Вузол додає інформацію до кешу маршрутів коли вивчає нові зв'язки між вузлами в радімережі. Для прикладу вузол може вивчити прийнятих з пакетів запиту маршруту, пакетів відповіді маршруту, вихідний маршрут. Також вузол видаляє з кешу маршрутів ті зв'язки між вузлами які в радімережі які мають розірвані зв'язки. Для прикладу вузол може дізнатися про розірване посилення отримавши пакет, що містить інформацію про помилку маршруту або через механізм повторної передачі канального рівня моделі OSI рівня шляхом отримання помилки передачі під час передачі кадру до вузла наступної стрибка. Щоразу коли вузол додає інформацію до кешу маршрутів, вузол перевіряє свій кеш на наявність маршруту до цільової адреси в кеш-пам'яті у разі наявності такого маршруту то вузол відправляє пакет за цим маршрутом та видаляється з кешу відправлення. Це дозволить використовувати мережу з іншими зовнішніми мережами. База знань зберігає всі вивчені маршрути з показниками залишкового заряду батареї, швидкості передачі даних, час затримки на маршруті, надійності маршруту, завантаженості маршруту та кількості ретрансляцій (хопів). База даних наповнюється шляхом вивчення

інформації про маршрут з пакетів передачі даних, та з пакетів запиту маршрутів. На основі бази знань відбувається формування таблиці маршрутизації. Відбувається формування вартості маршруту за допомогою нечіткої логіки, використовуючи модифікований алгоритм мурашиних колоній виконується пошук найкращого маршруту, та в подальшому знайдені маршрути записувати до таблиці маршрутизації. До таблиці маршрутизації записуються не більше чотирьох наявних маршрутів. У разі перевищення кількості маршрутів до вузла призначення вибираються шляхом ранжування кращі чотири маршрути. Наявність декількох маршрутів в таблиці маршрутизації дає змогу робити балансування завантаженості маршрутів

Дія 9. Визначення маршруту передачі пакету з врахуванням якості обслуговування. Система прийняття рішення направлення IP пакетів з урахуванням наявних маршрутів в базі даних маршрутів приймає рішення щодо відправки IP пакету відповідним маршрутом до вузла призначення з врахуванням QoS. Система прийняття рішення направлення використовує та виконує кроки відповідно до методу прогнозування часу перевантаження маршрутів передачі даних в мережах з можливістю до самоорганізації, що представлений в роботах [278, 279].

Дія 10. Запис IP пакету до кешу вихідних IP пакетів очікуючи своєї черги на надсилання пакету та доступного з'єднання в протоколі канального рівня моделі OSI.

Моделювання проводилися при наступних параметрах:

– засоби радіозв'язку з псевдовипадковою перестройкою робочої частоти (ППРЧ): діапазон частот – 30–512 МГц; потужність передавача – 10 Вт; ширина смуги частот, що випромінюється – 12,5 кГц, чутливість приймача –120 дБ; кількість ЗРЗ в мережі – 5; кількість частотних каналів для переналаштування – 10000; кількість перестроювання – від 333,5 до 1000 стрибків/сек;

– комплексів радіоелектронного подавлення (РЕП)–2; діапазон частот – 30–2000 МГц; потужність передавача – 2000 Вт; максимальна смуга частот, що може бути подавлена одночасно – 80 МГц, тип завади – шумова загороджувальна

завада з частотною маніпуляцією, як одна з найбільш поширених та вплив якої добре відомий; стратегія комплексу РЕП-динамічна.

До ПЕОМ було підключено 4 програмовані приймопередавачі LimeSDR (США) з програмним забезпеченням GNU Radio (Німеччина) та підключено до генератора шуму RIGOL DG5252 (Німеччина), що імітував роботу комплексу РЕП (рис. 1).

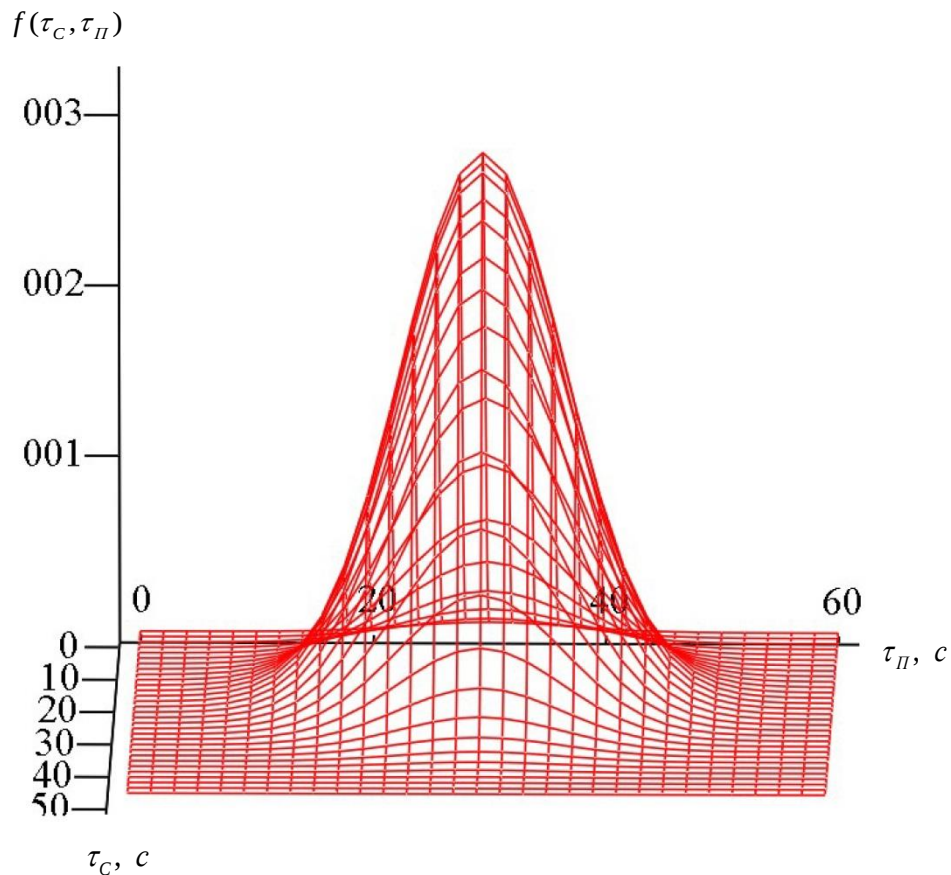


Рис. 1 Залежності тривалості повідомлень від часу реакції комплексу РЕП

Аналіз отриманих залежностей (рис. 1) показує, що значення $f(\tilde{\tau}_c, \tilde{\tau}_n)$ (рис. 1, а) менше за порогове значення. Тому в даному випадку рішення приймається переважно на основі аналізу змін тривалості повідомлення, на яке здійснювався вплив перешкод ($\tilde{\tau}_c$), та паузи після нього ($\tilde{\tau}_n$).

Для демонстрації ефективності навчання штучної нейронної мережі, що еволюціонує, був проведений прогноз часової захищеності мережі. Штучна

нейронна мережа, що еволюціонує використовувалася безпосередньо для навчання баз знань мурашиного алгоритму. Для проведення експерименту використовувалася навчальна вибірка, що містить дані про об'єкт моніторингу. Для експериментів використовувалося 5000 спостережень із цієї вибірки. Навчальна вибірка містила 3000 спостережень, тестова – 2000 спостережень.

У якості критерію якості прогнозування використовувався квадратний корінь із середньоквадратичної помилки.

Для порівняння якості прогнозування використовувалися багат шаровий персептрон (MLP), радіально-базисна нейронна мережа (RBFN) та штучна нейронна мережа, що еволюціонує.

Результати прогнозування для різних систем представлені в табл. 1.

Таблиця 1

Результати прогнозування для різних систем

Назва системи	Кількість параметрів, що налаштовуються	RMSE (навчальна)	RMSE (тестова)	Час, с
Багат шаровий персептрон	51	0.1058	0.1407	0.1081
Радіально-базисна нейронна мережа	21	0.1066	0.2155	0.1081
Еволюціонуюча каскадна система з нео-фаззі вузлами	20	0.0784	0.1081	0.1081

Зазначені результати видно з результатів в останніх строках табл. 1, як різниця індексу Ксі-Бені.

Основними перевагами запропонованої методики оцінки є:

– має гнучку ієрархічну структуру показників, що дозволяє звести завдання багатокритеріального оцінювання альтернатив до одного критерію або використовувати для вибору вектор показників;

- однозначність отриманої оцінки стану маршруту передачі інформації ;
- широка сфера використання (системи підтримки та прийняття рішень);
- простота математичних розрахунків;
- не накопичує помилку навчання;

- можливість адаптації системи показників в ході роботи;
- навчання не тільки синаптичних ваг штучної нейронної мережі, але й виду та параметрів функції належності;
- навчання архітектури штучних нейронних мереж;
- обчислення даних за одну епоху без необхідності зберігання попередніх обчислень;
- легкість адаптації до роботи в динамічних додатках;
- спирається на пам'ять про всю колонію замість пам'яті лише про попереднє покоління.

Варто відзначити, що запропонована процедура навчання показала кращий за критерієм РС (partition coefficient, РС – коефіцієнт розбиття) результат в порівнянні з EFCM і кращий за часом роботи результат в порівнянні з FCM. Дослідження показало, що зазначена процедура навчання забезпечує в середньому на 10–18 % більшу високу ефективність навчання штучних нейронних мереж та не накопичує помилок в ході навчання (табл. 1)

До недоліків запропонованого методика слід віднести:

- зміна розподілу ймовірностей вибору маршруту передачі при ітераціях оцінки стану маршруту передачі інформації;
- необхідність подальших досліджень для підвищення оперативності визначення часу збіжності;
- потрібне застосування додаткових методів, таких як локальний пошук;
- залежність від розвідувальних даних для настроювання параметрів, які підбираються лише виходячи на підставі наявних даних.

Зазначена методика дозволить:

- провести оцінку стану системи радіозв'язку та обрати раціональний маршрут передачі інформації;
- визначити ефективні заходи для підвищення ефективності управління;
- зменшити використання обчислювальних ресурсів систем підтримки та прийняття рішень.

За результатами проведеного аналізу ефективності запропонованої методики видно, що її обчислювальна складність на 15–25 % менше, у порівнянні з методиками, що використовуються для оцінки ефективності прийнятих рішень, які представлені в табл. 1. Зазначене дослідження є подальшим розвитком досліджень, що спрямовані на розробку методологічних засад підвищення ефективності інформаційно-аналітичного забезпечення, що опубліковані вже раніше [278, 279, 287].

Напрямки подальших досліджень слід спрямувати на зменшення обчислювальних витрат при обробці різнотипних даних в системах спеціального призначення.

Висновки

1. Запропонована в дослідженні динамічна модель оптимізації маршруті передачі інформації в радіомережі. Запропоновану модель відноситься до динамічних завдань маршрутизації з періодичним значеннями вершин і вузлів, що змінюються в результаті впливу дестабілізуючих чинників. Як критерій ефективності системи радіозв'язку спеціального призначення можна прийняти сумарні часові затримки, пов'язані з передачею інформації з вузла відправника до вузла адресата за період спостереження в умовах впливу дестабілізуючих чинників.

2. В ході дослідження розроблено метод маршрутизації в мережах радіозв'язку спеціального призначення, що дозволяє:

- провести вибір раціонального маршруту передачі інформації в умовах невизначеності;
- провести навчання штучних нейронних мереж для інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень.
- обробляти значення зв'язків між факторами, що представлені в вигляді чисел, вербальних описів, інтервалів, нечітких трикутних та трапецієвидних чисел.

3. Проведений приклад використання запропонованого методу на прикладі вибору маршруту передачі інформації в умовах впливу дестабілізуючих чинників. Зазначений приклад показав підвищення ефективності оперативності обробки даних на рівні 15–25 % за рахунок використання додаткових удосконалених процедур.