

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Перепеліцин Сергій Олександрович



УДК 043.3;043.5

ТЕХНОЛОГІЯ НАЛАШТОВУВАННЯ РАДІОМЕРЕЖІ В УМОВАХ ЗАВАД
ІНТЕГРАЦІЄЮ МЕТОДІВ МАРШРУТИЗАЦІЇ ТА САМОНАВЧАННЯ

05.13.06 інформаційні технології

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2021

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Національному авіаційному університеті Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник: доктор технічних наук, старший науковий співробітник
Кучеров Дмитро Павлович,
Національний авіаційний університет, професор кафедри «Комп'юторизованих систем управління»

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Сторчак Каміла Павлівна,
Навчально-науковий інститут інформаційних технологій Державний університет телекомунікацій, завідувач кафедри інформаційних систем і технологій;
кандидат технічних наук
Шишацький Андрій Володимирович,
Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних сил України
старший науковий співробітник науково-дослідного відділу розвитку засобів радіоелектронної боротьби науково-дослідного управління розвитку озброєння та військової техніки Спеціальних військ .

Захист відбудеться **12 травня 2021 р. о 13.00** годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.062.01 при Національному авіаційному університеті за адресою: проспект Любомира Гузара, 1, Київ, 03058.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного авіаційного університету за адресою: проспект Любомира Гузара, 1, Київ, 03058.

Автореферат розісланий 09 квітня 2021 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради,
к.т.н., доц.



Т.О. Охрімeнko

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. Широке використання багаторівневих, територіально розосереджених та розподілених інформаційних систем, до яких відносяться мобільні радіомережі, обумовлює необхідність забезпечення автономної роботи користувачів, що забезпечить своєчасне передавання та приймання даних.

Сучасна архітектура мобільних бездротових мереж має динамічну структуру, яка припускає відсутність базових станцій і фіксованої маршрутизації. Це вимагає швидкого адаптування в умовах зміни топології радіомережі та максимального використання мережевих ресурсів.

Відмітними ознаками сучасних і перспективних бездротових систем передавання даних, які відрізняють їх від засобів бездротових систем передавання попередніх поколінь, є застосування режиму OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) для підвищення загальної продуктивності бездротових радіомереж. Перспективною є система з трьома і більше абонентами, у якій організовується комунікація з використанням технології МІМО (Multiple Input/Multiple Output).

Ключовим фактором, що впливає на ефективність функціонування радіомережі, є використання завад природного та штучного походження, які обмежують їх функціонування, що проявляється в умовах цивільного та військового використання.

Проблемами керування мобільними радіомережами, координацію та інтелектуалізацію рівнів еталонної моделі взаємодії відкритих систем (OSI) досить докладно розглянуто у публікаціях вітчизняних вчених, таких як В.А.Романюк, М.В.Малярчук, С.П.Колачев, А.А.Швец, С.Г.Бунін, Т.М.Наритник, А.П.Войтер, М.Е.Ільченко, К.О.Єфанова, С.П.Бригадир, Т.Г.Гурський, О.Я.Сова, К.М.Гриценко, Ю.І.Гай, М.Д.Плотніков, М.В.Москалець, С. О.Осипчук, Р.М.Животовський, С.М.Петрук та ін., та зарубіжних вчених: E.S.Sousa, J.A.Silvester, E.Dahlman, S.Parkvall, J.Skold та ін., де досліджено динаміку мобільної радіомережі та проаналізовано вплив зміни топології на стійкість мережевої структури в цілому.

Разом з тим залишається не вирішеною проблема забезпечення ефективного функціонування мобільної радіомережі в умовах впливу завад природного та штучного походження, тому науково-прикладне завдання забезпечення функціонування радіомережі в умовах завад за рахунок створення нової інформаційної технології, яке поставлено в дисертаційній роботі, є актуальним.

Зв'язок роботи із науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота продовжує серію наукових досліджень, присвячених технологіям керування мобільною радіомережею тактичного рівня, методам керування БПЛА, аналізу створення та керування технологією «рою» мініатюрних дронів в умовах високої нестабільності та впливу завад. Обраний напрям досліджень збігається з напрямом досліджень за науково-дослідними роботами шифру «Сіріус» номер державної реєстрації 0119U101325, шифру «Тюльпан» номер державної реєстрації 0118U006194 та шифру «Амфібія» номер державної реєстрації 0119U101326 замовником яких є Головне

управління Національної гвардії України. Усі роботи виконані або виконуються Національною академією Національної гвардії України, де здобувач був керівником та відповідальним виконавцем.

Крім того, робота відповідає напряму дослідження за науково-дослідною роботою шифру «Развитие-3», що виконувалось здобувачем протягом 1987 – 1989 рр. у КВІРТУ ППО, м. Київ.

Мета та завдання дослідження. Метою роботи є підвищення завадозахищеності радіомереж, які діють в умовах в умовах завад штучного та природного походження.

Для досягнення поставленої мети в роботі сформульовано такі **завдання дослідження**:

1. Проаналізувати існуючі радіомережі та методи захисту радіомереж від завад .
2. Удосконалити структуру радіомережі на підставі проведеного аналізу.
3. Розробити метод налаштування радіомережі для запропонованої структури.
4. Розробити технологію налаштування та провести її експериментальне дослідження.

Об'єктом дослідження: є інформаційні процеси функціонування радіомережі в умовах дії радіозавад.

Предметом дослідження: є метод та моделі функціонування радіомереж, що діють в умовах завад.

Методи дослідження. Поставленні завдання вирішувалися із використанням методів системного аналізу при виконанні завдань порівняння та аналізу різних підходів до побудови радіомереж, алгоритмів налаштування, методи графів при аналізі ефективності алгоритмів маршрутизації, а саме алгоритмів Дейкстри та Беллмана-Форда, методи імітаційного моделювання та візуалізації стану радіомережі в геоінформаційній системі ArcGIS-10 американської компанії ESRI.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що в дисертації:

1. Уперше запропоновано новий метод інформаційного самоналаштування радіомережі на основі градієнтного підходу, який на відміну від методів, що існують, враховує інтеграцію методів маршрутизації та градієнтного підходу до налаштування приймального вузла.
2. Уперше розроблено інформаційну технологію самоналагоджування, яка відрізняється від тих, що існують, використанням алгоритму Дейкстри та градієнтного алгоритму, що дозволяє забезпечити належну якість функціонування радіомережі.
3. Удосконалено схему налаштування радіомережі, що відрізняється від відомих наявністю елементів, що перемикають мережу у вільну смугу частот в умовах застосування активних завад.
4. Отримав подальший розвиток алгоритм керування вузлом мобільної радіомережі, шляхом введення нової підсистеми вибору рангу радіомережі та модулю контролю зв'язності вузлів мобільної радіомережі, що забезпечує налаштування радіомережі в умовах реального часу.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що:

1. Створено алгоритмічне, інформаційне та програмне забезпечення компонент інтелектуальної системи керування вузлом мобільної радіомережі, які використовуються інформаційною технологією завадозахищеності даних мережі, яка функціонує в умовах завод.

2. Запропоновано автоматизоване оброблення даних з графічним зображенням топології радіомережі за допомогою геоінформаційної системи ArcGIS-10, що дозволяє провести візуалізацію структури радіомережі та виявити межі стійкої зв'язності вузлів комутації радіомережі.

3. Розроблено алгоритм налаштування радіомережі в умовах завод, що забезпечує ймовірність бітової помилки — $1,52 \times 10^{-5}$.

Особистий внесок здобувача. Основні положення та результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно. Автор виконав усі теоретичні та практичні дослідження, що становить основу дисертаційної роботи.

У виготовлених робочих зразках та опублікованих працях особисто або у співавторстві здобувачу належать такі результати: технічна реалізація радіостанції модема класу PRR; уперше удосконалено архітектуру мобільної радіомережі, у якій другий – п'ятий рівні самоналагоджувальної радіомережі оснащуються комунікатором або радіомодемом з мультиранговою системою комунікації (на частотах 2,4 – 18 ГГц) [1–2]; у загальноприйнятій еталонній моделі ІСК вузлом мобільної радіомережі введено підсистему вибору рангу радіомережі, яка здійснює перехід вузла і всієї радіомережі на інший ранг (смугу частот), якщо певні показники заводостійкості та функціонування не задовольняють вимоги функціонування вузла або мобільної радіомережі [1–3,5]; підсистема керування топологією загальноприйнятої еталонної моделі ІСК вузлом мобільної радіомережі доповнюється модулем контролю зв'язності вузлів мобільної радіомережі, який формує реакцію підсистеми контролю топології на зміни форми конфігурації мобільних абонентів радіомережі в русі і відображає зміни в геоінформаційній системі [6–9]; виконано дослідження за науково-дослідною роботою шифру «Развитие –3» (§ 3.6 Розробка і випробування системи формування широкосмугових сигналів. У підсумковому звіті; § 4.2.2 Результати випробувань системи заводозахисту) – проведено дослідження в галузі статистичного синтезу оптимальних просторово-часових фільтрів та аналізу просторово-тимчасових фільтрів; виготовлено макет просторово-часового фільтра і проведено натурні випробування швидкодії та глибини придушення фільтра [13–14]; виконано дослідження за науково-дослідними роботами шифру «Сіріус», шифру «Тюльпан» наведено результати моделювання, проектування експериментальних досліджень та випробувань електричних фільтрів, які пропускають смугу з надвисокою крутістю спусків амплітудно-частотної характеристики в широкому спектрі частот дециметрового діапазону з використанням методу низькочастотних прототипів фільтрів [4] – запропоновані фільтри не використовуються в сучасних компонентах радіомереж; проаналізовано стан мережевих систем охорони стратегічних об'єктів і запропоновано варіанти розроблення моделі мережевих структур фізичного захисту стратегічних та великих промислових рознесених об'єктів на базі систем

зображення візуальної інформації і розподілених у просторі динамічних датчиків [10–12]; виконано моделювання радіомережі на основі градієнтного алгоритму навчання, які підтверджуються теоретичними дослідженнями і практичними результатами; отримані результати завадостійкості радіомережі з режимом ретрансляції та показано, що реконфігурація ефективна, якщо вона відбувається зі швидкістю більшою за інтенсивність виведення вузлів з ладу приблизно у 2 – 5 разів.

Апробація результатів дисертації. Наведені в дисертації матеріали (методи і засоби) подавались на таких наукових заходах: наукова конференція 2020 IEEE International Conference on Problems of Infocommunications Science and Technology. October 6–9, 2020 p. Kharkiv, Ukraine; науково-технічна конференція National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” November 1 –22, 2020 p. Київ, Україна; XII Міжнародна науково – практична конференція “Advancing in research and education”, 07–10 грудня 2020 p., Ля-Рошель, Франція; наукова конференція.

Результати дисертаційної роботи використовуються у Військовому інституті КНУ ім. Тараса Шевченко на кафедрі геоінформаційних систем (Акт від 03.12.20 р.) та у ДКР «Гіацинт» у ТОВ «ЕСОММ» (Акт від 09.12.20 р.).

Публікації. Всього за тематикою дослідження опубліковано 14 наукових праць, в тому числі 5 статей у наукових фахових журналах [1–3,5,6], 1 стаття за кордоном, що входить до міжнародної наукометричної бази видань Scopus [4], 8 публікацій у матеріалах конференцій (1 включено до наукометричної бази даних SCOPUS) [7–14], 4 авторські свідоцтва СРСР на винаходи.

Структура та обсяг дисертаційної роботи. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, чотирьох додатків і містить 145 сторінок основного тексту, 32 малюнка, 28 таблиць, 26 сторінок додатків. Список використаних джерел містить 98 найменувань і займає 10 сторінок. Загальний обсяг роботи складає 172 сторінки.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

У вступі дисертації наведено загальну характеристику праці, обґрунтовано її актуальність, сформульовано мету та основні завдання дослідження, визначено методи вирішення поставлених завдань, сформульовано наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів.

У першому розділі, який присвячено аналізу доцільності застосування самоналагоджувальних радіомереж, представлено результати аналізу радіомереж, що існують, у яких показана перевага мобільних радіомереж у порівнянні зі стільниковими, транкінговими та супутниковими. Вони мають дуже високу завадо та розвід захищеність, високий рівень самоналаштування та розвинуті параметри архітектури.

Встановлено, що загальним недоліком сучасних мобільних вузькосмугових радіомереж обміну даними є висока вразливість від завад та низька швидкість обміну даними. Не вирішеними питаннями, що перешкоджають розповсюдженню самоналагоджувальних радіомереж, у цивільній та у

військовій сфері є: відсутність організації надійного передавання даних при змінній структурі та топології мережі в умовах завад; складність забезпечення для кожного з користувачів мережі заданого рівня якості обслуговування (QoS, Quality of Service), визначеної у рекомендаціях ITU – T P.800; відсутність ефективних алгоритмів керування вузлами радіомережі із самоорганізацією в умовах завад, наприклад, в реальних умовах бойових дій; відсутність адаптивної зміни ресурсів у просторі частота – код; низька відмовостійкість вузлів радіомереж в реальних умовах конфлікту; проблема масштабованості в радіомережах великої розмірності. Сформульовано завдання дослідження.

У другому розділі, який присвячено методам та підходам до інтелектуалізації радіомережі, показано необхідність введення елементів інтелектуалізації мобільних радіомереж.

Згідно із завданнями в інтелектуальну систему керування вузлом мобільної радіомережі введемо:

- пошукове налаштування рівня шумів або сигналу завади на вхідному тракті комунікатора;
- контроль зв'язності комутації вузлів мобільної радіомережі.

Інтелектуалізація системи керування вузлом мобільної радіомережі – це процес використання технологій оброблення бази знань для формування правил доцільної поведінки вузла радіомережі в залежності від умов, які склалися в її структурі функціонування.

На рис. 1 представлено схеми системи керування вузлом мобільної радіомережі (а) та пошуку нового маршруту мобільної радіомережі в умовах завад (б).

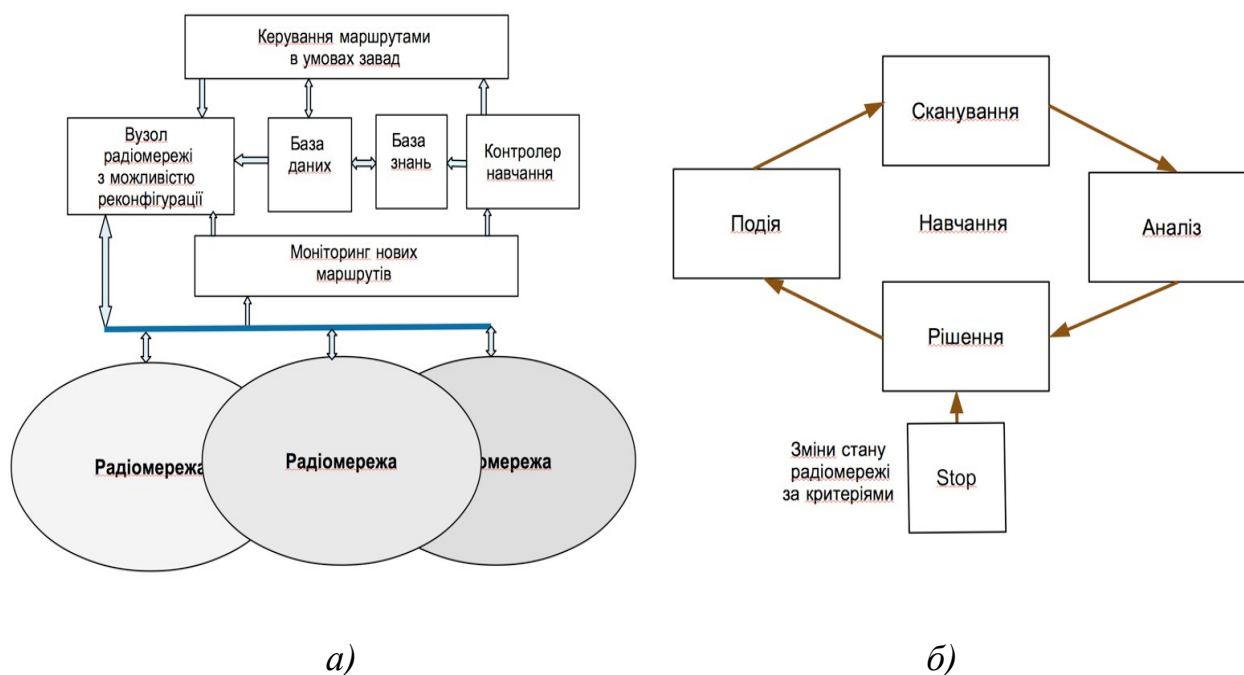


Рис. 1. Схеми системи керування із врахуванням пошуку нового маршруту мобільної радіомережі в умовах завад, а) та навчання вузла мобільної радіомережі, б)

Удосконалено метод аналізу топології радіомережі за допомогою представлення мережі умовним графом та розрахунку матриці інцидентності.

Показано, що елементи головної діагоналі матриці суміжності $G^T G$ відповідають частоті появи того чи іншого ребра. Сутність удосконалення методу полягає у використанні торцевого добутку матриць, що у порівнянні з використанням кронекеровського добутку матриць, дозволяє розширити можливості аналізу топології мережі, автоматизувати окремі його етапи шляхом формування матриць інцидентності та суміжності другого і найвищих порядків.

В результаті проведеної роботи встановлено, що окрім маршрутизації, яка дозволяє забезпечити належний трафік даних, інтелектуалізації можна досягти також введенням в приймальні вузли радіомережі елементів навчання, що здатне підвищити завадозахищеність в умовах активних завод за рахунок удосконалення структури системи керування радіомережею.

У третьому розділі – «Налаштовування радіомережі» побудовано модель інформаційної технології, яка відповідає критеріям концепції C4ISR, що є базовими для переходу збройних формувань України на нову організацію ведення бойових дій.

Розроблено архітектуру передавання та приймання L -канальної системи вузла мобільної радіомережі, яка використовує OFDM сигнали, у яких смуга пропускання каналу розбивається на групу вузьких смуг (субканалів), кожен зі своєю частотою-носієм. На всіх частотах сигнал передається одночасно, що дозволяє забезпечити велику швидкість передачі інформації при невеликій швидкості передачі в кожному окремому субканалі. Додаткову захищеність інформації від завод забезпечують модулі кодування-декодування, які використовують дво- та трикомпонентних турбокоди, системи гібридного автоматичного запиту повторної передачі HARQ (Hybrid Automatic Repeat Request), кодеків Уолша, кодеків Ріда-Соломона.

Запропоновано також удосконалення структури системи керування приймальним вузлом мобільної радіомережі з елементами багаторангової системи комунікації. В умовах активних завод така архітектура дозволяє переводити всю радіомережу на іншу смугу частот. У модель інтелектуальної системи керування (ІСК) вузлом мобільної радіомережі вводиться підсистема вибору рангу радіомережі. Алгоритм функціонування цієї підсистеми складається з таких кроків: контролю, збирання, оброблення та зберігання даних випадків, за яких вузол перевантажується сигналом активної заводи; аналіз показників функціонування вузла та мобільної радіомережі; виконання переходу вузла і всієї радіомережі на інший ранг (смугу частот), якщо певні показники функціонування мережі не задовольняють вимогам функціонування вузла і мобільної радіомережі.

Узагальнена структура інтелектуальної системи керування вузлом мобільної радіомережі (рис.2) повинна бути реалізована всіма елементами радіомережі, зокрема центром керування мережею, базовими станціями та мобільними користувачами (вузлами).

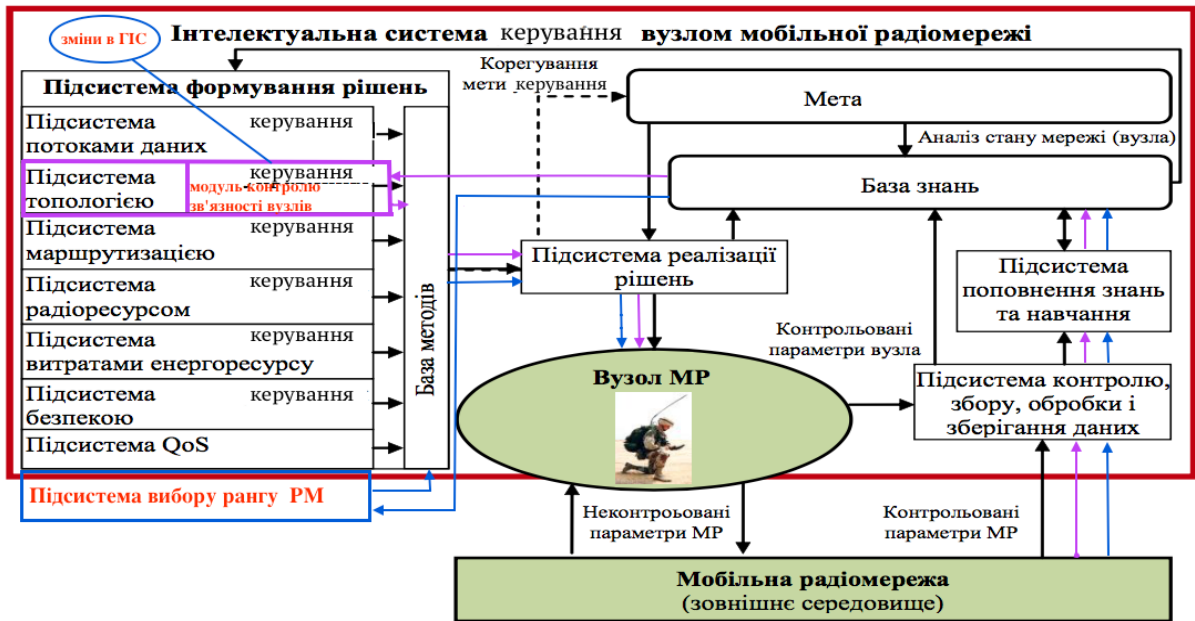


Рис. 2. Структура інтелектуальної системи керування вузлом мобільної радіомережі

Алгоритм використовується протоколами маршрутизації OSPF і IS-IS в IP-мережі, якою є самоналогджувальна радіомережа. Цей алгоритм використовується підсистемою формування рішень – підсистемою керування маршрутизацією. Самонавчання є ключовим для розв'язання складних проблем, які виникають у радіомережі в умовах завад або навмистних перешкод. В інформаційній технології радіомережі застосовується алгоритм самонастроювання багат шарової нейронної мережі BP (back propagation – зворотне поширення помилки).

В якості алгоритму маршрутизації запропоновано застосовувати алгоритм Дейкстри. Якщо мережу подавати орієнтованим графом, тоді ваги w_{ij} ребер графу запропоновано розраховувати в залежності від пропускної здатності $c_{ij}(t)$ за формулою

$$w_{ij} = \frac{10^8}{c_{ij}(t)} \quad (1)$$

При цьому в кожний розрахунковий момент часу t на i -ий приймальний вузол поступає сумарний потік інформації, призначений для передавання кожному вузлу j . Цей потік визначає таблицю маршрутизації, яку можна визначити динамічною матрицею $P(t)$ розмірності $N \times N$ з нульовою головною діагоналлю, N – кількість приймальних вузлів.

Резервування пропускної здатності повинно враховувати навантаження мережі. Для контролю, маршрутизатор доповнюється засобами вимірювання навантаження, які будуть створювати матрицю навантажень $X = |x_{ij}|$. Тоді алгоритм з резервуванням трафіку (2) може бути записаний як

$$\bar{c}_{ij}(t) = \begin{cases} c_{ij} + \Delta, & \text{якщо } c_{ij} < x_{ij}, \\ c_{ij}, & \text{якщо інакше,} \end{cases} \quad (2)$$

Довжина шляху на кожному кроці k від вершини s визначається за правилом:

$$L_k = \min_V [L(k), L(V) + w_{ij}], \quad \text{для } V \in G, L(s)=0, \quad (3)$$

де $1 \leq i \leq j \leq N$, $G=(V, E)$ – граф мережі, $V=\{v_1, v_2, \dots, v_N\}$.

Правило (3) не дозволяє робити проходи по дугах графа G з великою вагою. Таким чином, множина вершин у графі G являє собою впорядковану послідовність зв'язаних між собою вузлів радіомережі, яка містить найкоротший шлях від вершини s до k . Число ітерацій алгоритму визначається кількістю приймальних вузлів, тому часова складність алгоритму $O(N)$.

Порівняння алгоритму Дейкстри з алгоритмом Беллмана-Форда дійшло до висновку, що при однакових розмірах графа алгоритм Дейкстри є менш ресурсомістким ніж Беллмана-Форда, та є більше швидким тому, що не відкидає ребра з великою вагою та ітераційно розраховує довжину усіх шляхи в графі, запам'ятовуючи мінімальний шлях.

Якщо декодування відбувається в умовах шуму, то результатом є неправильна ідентифікація символів і може отримуватися зовсім нечитабельна інформація. Для зменшення впливу шуму на приймальний вузол запропоновано застосовувати навчання радіомережі.

Налаштування вузла радіомережі запропоновано проводити за алгоритмом:

$$w_j(n+1) = w_j(n) + \Delta w_j(n), \quad (4)$$

де w_j – ваговий коефіцієнт j -го вузла, n - порядковий номер ітерації виправлення w_j , а Δw_j – поправка, обчислена як (6):

$$\Delta w_j(n) = k e_j(n), \quad (5)$$

де k – коефіцієнт, що визначає швидкість налаштування, $e_j(n)$ – сигнал корекції помилки, що діє на вході вузла, і визначається (7):

$$e_j(n) = d_j(n) - x_j(n) w_j(n), \quad (6)$$

де $d_j(n)$, $x_j(n)$ – бажаний вхід та вихід j -го вузла.

Для забезпечення глобальної збіжності алгоритму налаштування використано алгоритм нелінійної оптимізації (Левенберга–Марквардта), який використовує для пошуку мінімально комбіновану стратегію – лінійну апроксимацію та градієнтний спуск. Застосування алгоритму Левенберга–Марквардта (8), де коригування визначається таким чином:

$$\Delta w_j = (J^T J + \mu E)^{-1} J^T e_j. \quad (7)$$

В (7) E – одинична матриця E , μ – параметр регуляризації, $\mu > 0$, який дозволяє забезпечити вимогу позитивної визначеності $J^T J$. При великих μ алгоритм має властивості встановлення градієнта, якщо μ мале, алгоритм діє подібно до методу Гауса – Ньютона. Для спрощення обчислень під час обчислення матриці J запропонована обчислювальна процедура:

$$J_j = J_{j-1} + \lambda \frac{\Delta e_j - J_{j-1} \Delta w_j}{|\Delta w_j|^2} \Delta w_j^T. \quad (8)$$

Навчання досягає мети, коли похибка навчання не перевищує деякого малого значення $\varepsilon > 0$, що задається конструктором системи, тобто:

$$|e(w)| \leq \varepsilon. \quad (9)$$

Моделювання методу градієнтного пошуку виконувалося у середовищі програмування MATLAB шляхом генерації на вході приймального вузла короткого повідомлення, що складається з букв латинського алфавіту, що складається з 26 символів та пробілу. Векторне подання символу із 35 крапок у середовищі програмування MATLAB має вигляд:

літера Н = [1 0 0 0 1 1 0 0 0 1 1 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 1 1 0 0 0 1 1 0 0 0 1].

Один з символів повідомлення без впливу шуму та викривлений шумом, показано на рис.3.

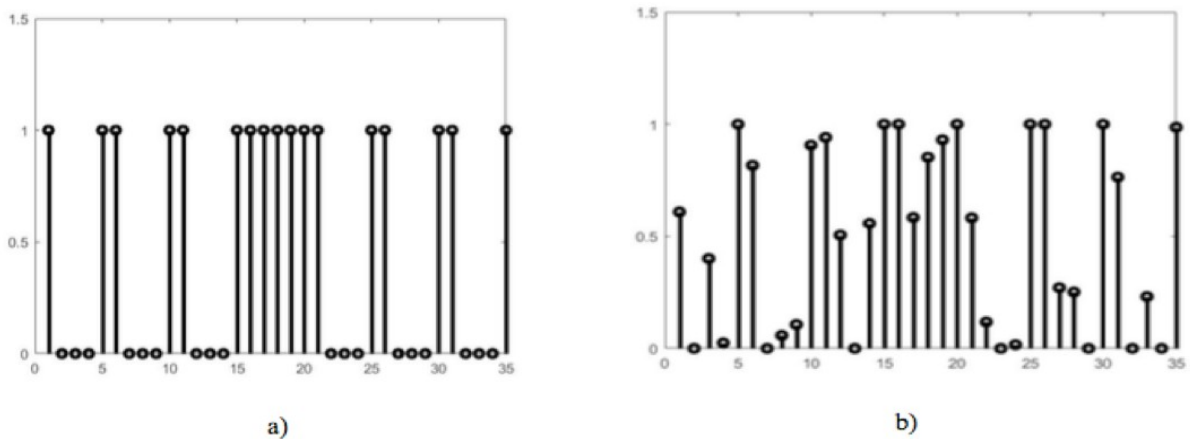


Рис. 3. Символ викривлений шумом

Далі визначаємо нейронну мережу ВР з трьома шарами. Початкова структура має два шари. Кількість нейронів у першому шарі становить 33, а у другому – 27, що відповідає кількості мережевих виходів, тренування алгоритмами (2)–(4), (6). Для усунення проблеми перекваліфікації мережі, коли мережа запам'ятовує вхідні сигнали і добре навчена на них, через шум, у вхідних сигналах, мережа втрачає властивість правильно класифікувати вхідні символи, пропонується розділити вхідний набір на три різні частини, що не

перетинаються, а саме: навчальну, тестову та дійсну підмножин. Як правило, набір вхідних даних ділиться на 0,7: 0,15: 0,15, де велика кількість відповідає навчальному набору, а тест і тест поділяються на рівні частини між рештою елементами. Вибір елементів у кожній підмножині виконується випадковим чином. Результати навчання оцінювалося за показниками регресії та помилки навчання, їх подано на рис. 4.

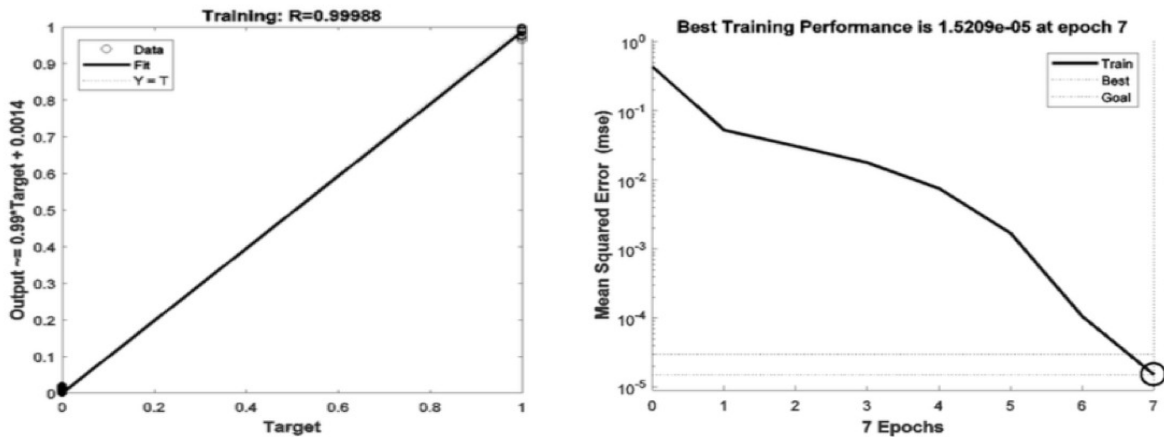


Рис. 4. Лінія регресії та помилка навчання.

Запропонований підхід налаштування надає високий ступінь кореляції між вхідними та вихідними даними, $R=0,999$ та прийнятною похибкою $e=1,52 \cdot 10^{-5}$.

Розглянемо також приклад розпізнавання фрази за налаштованою мережею. Як посилання використовується фраза «ТРИВОГА», яка подається в графічному вікні для відображення інформації послідовністю символів - рис.5а. Ту саму фразу, спотворену шумом, показано на рис.5б, а неправильне розпізнавання – на рис.5 в.

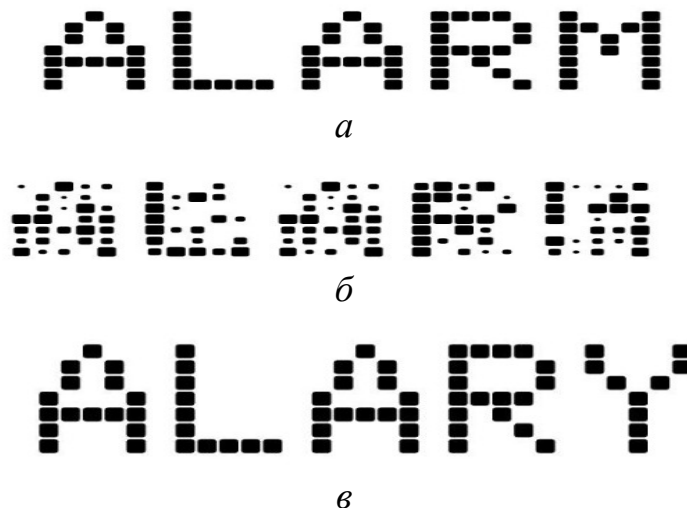


Рис. 5. Довідкова фраза для розпізнавання налаштованою мережею (а), фраза, спотворена рівнем шуму 0,5 (б) та фраза, розпізнавання з помилками (в).

Проаналізовано також вплив кількості нейронів у прихованому шарі, рівень шуму та кількість шарів на ймовірність правильного розпізнавання, помилки та час навчання. Результати цього аналізу наведено в табл.1–3, з яких видно, що чим більше різноманіття вхідних сигналів, тим більше нейронів має міститися у

прихованому шарі. Збільшення кількості шарів призводить до збільшення розпізнавання якості в умовах шуму, хоча чим сильніші завади, тим більше шарів повинно бути включено для забезпечення якісного розпізнавання, але це збільшує навчання.

Таблиця 1. Вплив кількості нейронів у шарі

Кількість нейронів	6	13	26	33	52
Імовірність правильного розпізнавання, %	37,5	87,5	100	100	100
Помилка розпізнавання, $\times 10^{-5}$	0,06	2,67	0,28	1,45	1,74
Час навчання, s	1	2	4	8	35

Таблиця 2. Вплив шуму на якість розпізнавання

Кількість нейронів	26			33			52		
Рівень шуму	0,25	0,5	0,75	0,25	0,5	0,75	0,25	0,5	0,75
Імовірність правильного розпізнавання, %	100	75	37,5	100	62,5	37,5	100	75	75
Помилка розпізнавання $\times 10^{-5}$	0,28	1,75	1,72	1,45	0,07	2,73	1,74	0,5	0,05
Час навчання, s	4	9	5	8	8	7	35	23	65

Таблиця 3. Вплив кількості шарів на якість розпізнавання

Кількість нейронів	2	3	4
Імовірність правильного розпізнавання, %	100	100	100
Помилка розпізнавання $\times 10^{-5}$	2,36	0,5	0,05
Час навчання, s	9	27	65

Повний аналіз нейронної мережі в обмеженому дослідженні досить складний, але цей аналіз показав, що нейронна мережа працює ефективно, якщо активаційні функції всіх шарів нелінійні, а процес навчання зближується з мінімальною похибкою (основний результат). Як очікувалося, чим більше нейронів у прихованому шарі, тим краще розпізнавання в умовах інтерференції. Рівень втручання, як правило, впливає на час та ймовірність розпізнавання, що підтверджується дослідженнями.

Алгоритм самоналаштування багатошарової нейронної мережі ВР є керованим алгоритмом – це ітеративний метод градієнтного пошуку найкращих параметрів у даних умовах, що характеризується простотою класифікаційного завдання з точки зору «вхід-вихід» та надійністю роботи.

На рис.6 представлена взаємодія технологій маршрутизації та навчання при забезпеченні абонентів радіомережі.

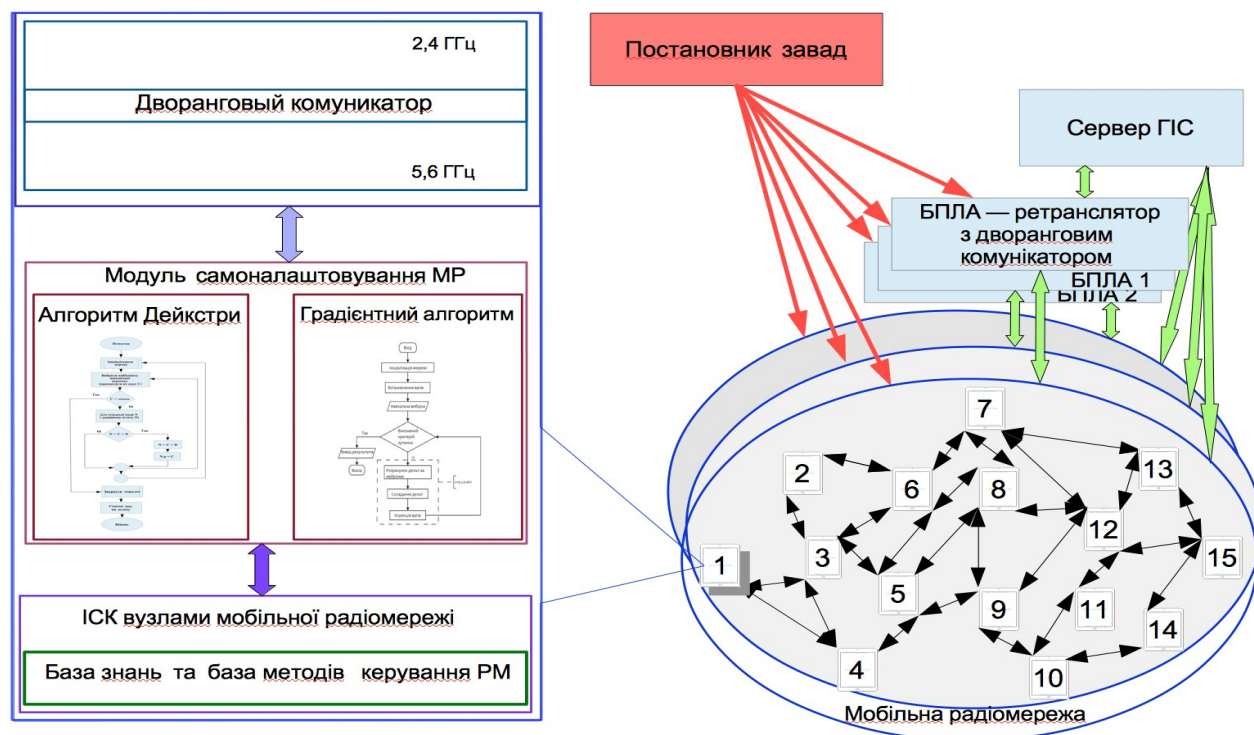


Рис.6. Схема взаємодії компонент технології налаштування радіомереж

Представлені технології незалежні по завданням тому можуть функціонувати на паралельній основі, що забезпечує їх ефективну взаємодію в умовах реального часу. Ці дві технології утворюють загальну запропоновану інформаційну технологію, яка є інтеграцією маршрутизації та навчання.

Під час передавання інформації по каналах зв'язку виникають помилки, при цьому дані спотворюються і не можуть бути використані на боці приймання для подальшого оброблення. У радіомережах можуть бути застосовані: кодеки дво- та трикомпонентних турбокодів, системи гібридного автоматичного запиту повторної передачі HARQ, кодеків Уолша, кодеків Ріда-Соломона, послідовності Шапіро–Рудіна, коди Баркера, коди Голда, M -послідовності, послідовності Адамара та багатофазні послідовності Френка та Задова-Чу, послідовності Мілевського, послідовності Голя та ін..

Четвертий розділ – «Моделювання та експериментальне дослідження» присвячено моделюванню.

Для аналізу радіомереж тактичного рівня запропоновано евристичний метод матричного аналізу топології мобільної радіомережі на основі кронекеровського добутку матриць. Моделювання та аналіз завадостійкості мобільної радіомережі проводилося в залежності від топології на місцевості без режиму ретрансляції. Зроблені оцінки впливу стосуються виключно топології. В якості критерію завадостійкості мобільної радіомережі розглянуто максимальну дальність гарантованої передавання даних одного вузла мережі.

Уведено коефіцієнт топологічної невизначеності G_{\emptyset} радіомережі, який має вигляд:

$$G_{\emptyset} = 0,7 \sum E_{ij} > E_{r \min}, \quad (10)$$

На рис. 6 показаний приклад зміни конфігурації радіомережі при зміні колової конфігурації.

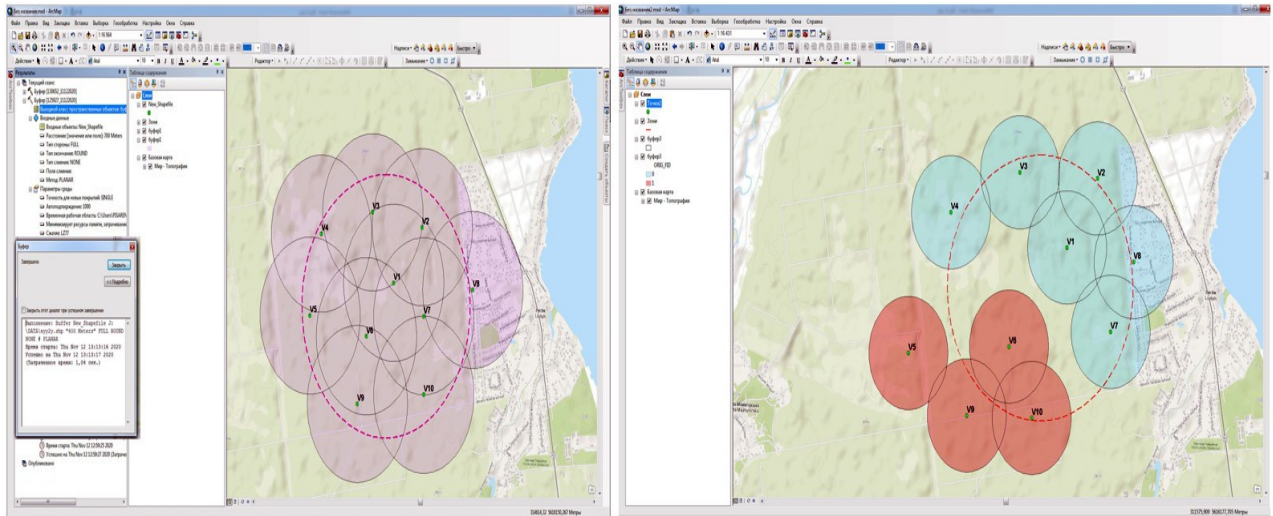


Рис. 7. Зміна топології радіомережі з 10 абонентів з конфігурацією у формі кола

На рис. 8 представлений графік залежності варіантів маршрутизації від топології (а) та кількості вузлів (б) мобільної радіомережі на місцевості.

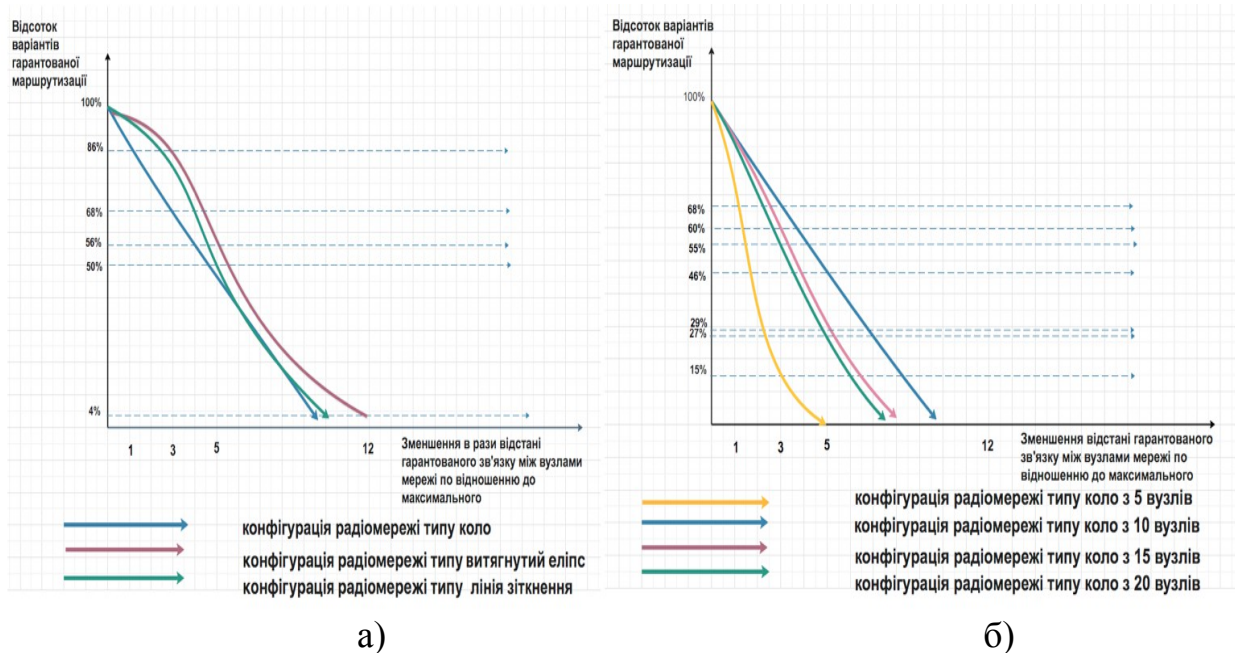


Рис. 8. Графік залежності варіантів маршрутизації від топології (а) та кількості вузлів (б) мобільної радіомережі на місцевості

Найбільш завадостійкою є конфігурація радіомережі на місцевості в формі витягнутого еліпса. При конфігурації наближеної до форми кола стійкість радіомережі зменшується на 10–13% в порівнянні з конфігурацією у вигляді витягнутого еліпса, але відсоток гарантованої маршрутизації зменшується до 50% при розширенні структури у п'ять разів. При конфігурації у вигляді витягнутої лінії стійкість радіомережі зменшується на 4–6% в порівнянні з конфігурацією у вигляді витягнутого еліпса.

Досліджувалася колова структура радіомережі з числом вузлів від п'яти до двадцяти. Встановлено, що найкращі показники має радіомережа із десяти вузлів. При цьому збільшення площі дії втричі дозволяє отримати відсоток гарантованої маршрутизації 68%, при збільшенні площі дії у п'ять разів відсоток гарантованої маршрутизації зменшується до 46%. Зі збільшенням кількості вузлів до п'ятнадцяти і двадцяти відсоток гарантованої маршрутизації змінюється із 60–55% до 29–27% відповідно.

Швидкість реконфігурації повинна перевищувати швидкість виявлення збоїв у радіомережі. При перевантаженні чи збої топологія радіомережі змінюється до стану «шина». При виході з ладу елементів мережі, відбувається перехід системи до іншого стану. Оскільки ланцюг послідовний, то функціонування системи можна подати у вигляді схеми «загибель-розмноження».

Аналіз інтелектуального керування маршрутизацією в радіомережах нестабільної топології з режимом ретрансляції проводився за відомою схемою «загибель-розмноження». Результати розрахунку ймовірності функціонування системи для зміни станів 5 вузлів, інтенсивності відмов $\rho=0.5$ та трьох значень $\mu_1=0,8$, $\mu_2=1,6$, $\mu_3=2,4$ за наведеною схемою наведено табл. 1, які показують деградацію стану радіомережі в умовах завад.

Таблиця 1.

Результат розрахунку

μ	P_0	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5
0,800	0,400	0,250	0,156	0,098	0,061	0,037
1,600	0,690	0,220	0,070	0,020	0,010	0,000
2,400	0,79	0,170	0,030	0,010	0,000	0,000

Швидкість реконфігурації системи асоційовано з інтенсивністю відмов ρ та відновленням μ вузлів радіомережі.

Розрахунок за схемою «загибель-розмноження» показує, що реконфігурація ефективна, якщо вона відновлюється зі швидкістю більшою за інтенсивність виведення вузлів з ладу приблизно у 2–5 разів. Найбільш завадостійкою є конфігурація радіомережі на місцевості в формі витягнутого еліпса; відсоток гарантованої маршрутизації зменшується до 50% при збільшених в п'ять разів відстані між вузлами мережевої топології; зв'язок із застосуванням активних завад, може бути забезпечений для шести абонентів з групи, яка складається з десяти абонентів, за конфігурації у формі кола.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішено завдання, що пов'язане з підвищенням завадостійкості сучасних мобільних радіомереж, яке полягає у інтеграції методів маршрутизації та градієнтного налаштування приймального вузла, що в цілому складає запропоновану інформаційну технологію.

Під час виконання дисертаційного дослідження отримано наступні результати :

1. В результаті аналізу існуючих радіомереж та методів їх захисту від завад встановлено, що розроблення нових методів завадозахищеності радіомереж, що базуються на методах навчання, є новим, актуальним науково-прикладним завданням.

2. При вивченні алгоритмів роботи радіомереж в умовах завад з'ясувалася перевага використання інтеграційного підходу до створення радіомереж нового покоління, що дало змогу створити нову інформаційну технологію, яка включає маршрутизацію на основі алгоритму Дейкстри та градієнтного підходу до налаштування приймального каналу, які можуть бути застосовані незалежно та функціонувати паралельно.

3. На підставі вивчення та порівняння різних підходів до алгоритмів навчання, що використовується в нейромережах, визначено перевагу застосування градієнтного підходу в умовах завад, який дозволяє забезпечити передавання інформації в умовах завад з ймовірністю бітової помилки не гірше ніж $1,52 \cdot 10^{-5}$.

4. Удосконалено аналіз топології радіомережі, який полягає у використанні торцевого добутку матриць, що у порівнянні з кронекеровським добутком дозволяє підвищити точність оцінювання завадос тійкості мережі при зміні конфігурації на 10-13%, а також виявити можливість збільшення взаємних відстаней між вузлами до 5 разів відносно радіусу дії окремого вузла, що встановлено границею зв'язності вузлів мобільної радіомережі.

Дисертаційне дослідження не вичерпує всіх аспектів означеної проблеми. Науковий пошук варто продовжити у таких напрямках, як удосконалення методів налаштування приймального вузла та використання нових алгоритмів роботи радіомережі в умовах завад.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ АВТОРА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

1. Перепеліцин С.О., Лесько О.В. Використання технології надширококутних сигналів та самоналагоджуваної мережі в управлінні БПЛА військового призначення / Вісник інженерної академії України. К. НАУ. – № 4, 2019, с.28–34.

2. Перепеліцин С.О. Система захисту від загроз удару БПЛА із використанням блоків нейромережевого аналізу / Наукоємні Технології.– К.НАУ. – №1(45), 2020, с.19–27.

3. Перепеліцин С.О. Аналіз можливості застосування хмарних обчислень у військових бездротових мережах управління тактичного рівня. – Сучасна спеціальна техніка. – К. № 2 (61) , 2020, с.47–58.

4. Naritnyk T.M., Korsun V.I., Korsak V.F., Borisko A.V., Vovkotrub A.V. Perepelitsyn S.O. The results of modeling, design and development of bandpass filters with cross-links in a wide range of decimeter frequencies / Telecommunications and Radio Engineering, – № 79 (13), 2020. с.1121–1127 .

5. Perepelitsyn S. O. Recognition of text phrases distorted by interference by back propagation neural network / S. O. Perepelitsyn, D. P. Kucherov, V. G. Tkachenko et al // Electronics and Control Systems. - Vol. 3. - № 65. - 2020. - P. 46-54.

6. Слюсар В.И., Перепелицын С.А. Применение торцевого произведения матриц в задачах анализа топологий маршрутизации многогранговых сетей.// Озброєння та військова техніка. - №1. - 2021 — с. 56-63.

7. Kucherov D., Berezkin A., Perepelitsyn S. Some Features of LoRa Technology under Multi-Ray Reception / 2020 IEEE International Conference on Problems of Infocommunications Science and Technology, 2020, Kharkiv, Ukraine, p. 6-9.

8. Слюсар В.І., Перепеліцин С.О. Аналіз топології багаторангових мереж на основі торцевого добутку матриць / Міжнародна науково-технічна конференція «Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи». – К. КПІ ім. Ігоря Сікорського, 16–22.11. 2020 р. Київ, Україна, с. 114-116.

9. Слюсар В.І., Перепеліцин С. О., Писаренко Р.В. Вплив топології на конфігурацію рухомих мультирангових мереж./ XII Міжнародна науково - практична конференція “Advancing in research and education”, 07–10.12. 2020 р., Ля-Рошель, Франція, с. 558-563.

10. Перепеліцин С.О. "Перспективні розробки комбінованих автоматичних стаціонарних радіоелектронних засобів охорони з динамічним мультимедійним відображенням інформації"/ Доповідь на Міжнародному форумі "Фізична і ядерна безпека", Київ 2005 р., с. 170-171.

11. Перепеліцин С.О. "Розробка моделей і мереж фізичного захисту стратегічних і великих промислових рознесених об'єктів на базі систем відображення образної інформації і просторово-розподілених динамічних датчиків"/ Доповідь на Міжнародному форумі "Фізична і ядерна безпека", г. Київ, 2006 р., с.104-126.

12. Перепеліцин С.О. "Третє тисячоліття: нові загрози - мислення, ідеї, моделі, інсталяції систем безпеки індустриальних об'єктів підвищеної небезпеки", Доповідь на Міжнародному форумі "Фізична і ядерна безпека", Київ. – 2007 р., с. 98-104.

13. Зінчук Б.Е., Перепеліцин С.О. "Синтез та аналіз багатоканальних автокомпенсатора перешкод на основі методів марковської теорії нелінійної фільтрації" / Доповідь на науковій конференції, НДІ «Стріла» м. Тула, 03–04.- 1989 р., у відкритому доступі відсутня.

14. Зінчук Б.Е., Перепеліцин С.О. "Підвищення скритності РЛС на основі використання властивостей динамічних антен"/ Доповідь на науковій конференції, НДІ «Стріла», м. Тула, 04.1989 р. , у відкритому доступі відсутня.

АНОТАЦІЯ

Перепеліцин С.О. Технологія налаштування радіомережі в умовах завад інтеграцією маршрутизації та самонавчання – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.06 – Інформаційні технології. – Національний авіаційний університет, Міністерство освіти і науки України, Київ, 2021.

Дисертаційна робота присвячене розв'язання науково-технічної задачі зі створення інформаційної технології моделювання ефективного контролю за топологією однорангової мобільної радіомережі, що само налагоджується, тактичного рівня й управління зміною показників її функціонування в умовах впливу радіоперешкод та радіоелектронної протидії (РЕБ).

У дисертаційній роботі вперше запропоновано нова топологія, що відрізняється від відомих тим, що включає елементи навчання поведінки мережі в умовах перешкод.

Введені нові процеси інтелектуальної системи керування вузлом мобільної радіомережі: пошукова настройка рівня шумів або сигналу перешкоди на вхідному тракті комунікатора та контроль зв'язності комутації вузлів мобільної радіомережі. Запропоновано новий метод самонастроювання радіомережі на основі градієнтного підходу, що відрізняється від відомих, інтеграцією градієнтного алгоритму налаштування ваги сусідніх вузлів і пошуку найкоротшого маршруту в мережі, що підлягає впливу перешкод, що адекватно вирішення завдань ітераційної оптимізації.

Отримано нові результати для моделювання радіомережі, що відрізняються від відомих тим, що виконано моделювання радіомережі на основі градієнтного алгоритму навчання, які підтверджуються теоретичними дослідженнями й практичними результатами. Запропоновано технологію автоматизованої обробки даних з графічним представленням топології радіомережі за допомогою геоінформаційної системи ArcGIS-10 американської компанії ESRI, яка дозволяє оцінити стійкість мережевої структури в динамічній зміні та виявити кордони стійкої зв'язності вузлів комутації радіомережі.

Такий підхід є новою варіацією яка розширює межі розв'язання задачі розподілу трафіку і перешкодостійкості радіомережі з урахуванням структури мережевої топології. Практичне значення отриманих результатів моделювання та експериментальне дослідження підтвердило правильність запропонованих рішень та отриманих теоретичних результатів.

Ключові слова: технологія моделювання радіомережі, що само налагоджується; мережі в умовах перешкод; топологія, що включає елементи навчання; тензорний аналіз; моделі у вигляді графі; градієнтного алгоритму навчання; пошук найкоротшого маршруту в мережі.

АННОТАЦІЯ

Перепелицын С.А. Технология настройки радиосети в условиях помех интеграцией методов маршрутизации та самообучения – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.06 - Информационные технологии. - Национальный авиационный университет, Министерство образования и науки Украины, Киев, 2021.

Диссертация посвящена решению научно-технической задачи по созданию информационной технологии моделирования эффективного контроля за топологией одноранговой мобильной самонастраивающейся радиосети тактического уровня и управление изменением показателей ее функционирования в условиях воздействия радиопомех и радиоэлектронного противодействия (РЭБ).

В диссертационной работе впервые предложено новая топология, отличающийся от известных тем, что включает элементы обучения поведения сети в условиях помех. Введены новые процессы интеллектуальной системы управления узлом мобильной радиосети: поисковая настройка уровня шумов или сигнала помехи на входном тракте коммутатора и контроль связности коммутации узлов мобильной радиосети.

Предложен новый метод самонастройки радиосети на основе градиентного подхода, отличающегося от известных, интеграцией градиентного алгоритма настройки веса соседних узлов и поиска кратчайшего маршрута в сети, подверженной воздействию помех, адекватно решению задач итерационной оптимизации.

Получены новые результаты для моделирования радиосети, отличающиеся от известных тем, что выполнено моделирование радиосети на основе градиентного алгоритма обучения, подтверждаются теоретическими исследованиями и практическими результатами. Предложено геоинформационную технологию автоматизированной обработки данных с графическим представлением топологии радиосети с помощью геоинформационной системы ArcGIS-10 американской компании ESRI, которая позволяет оценить устойчивость сетевой структуры в динамическом изменении и выявить границы устойчивой связности узлов коммутации радиосети.

Такой подход является новой вариацией которая расширяет границы решения задачи распределения трафика и помехоустойчивости радиосети с учетом структуры сетевой топологии. Практическое значение полученных результатов моделирования и экспериментальное исследование подтвердило правильность предложенных решений и полученных теоретических результатов.

Ключевые слова: технология моделирования радиосети, что само налаживается; сети в условиях помех; топология, включающий элементы обучения; тензорный анализ; модели в виде графе; градиентного алгоритма обучения; поиск кратчайшего маршрута в сети.

ABSTRACT

Perepelitsyn S.O. Setting up technology a radio network in the interference conditions by integrating routing and self-learning methods – As a manuscript.

Thesis on scientific degree of candidate of technical sciences on information technology (degree 05.13.06), National Aviation University of Ukraine, The Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2020.

The scientific degree thesis is devoted to solve the task to create an efficient modeling technology for network topology of peer-to-peer mobile self-adaptive tactical military radio network and to manage the changing performance indicators of such radio network under radio frequency interference and defense.

The scientific thesis first time offered a brand new topology differing from existing ones, that researches network behavior under circumstances of interference and radiofrequency defense. Innovative intellect management of mobile radio network node were introduced: search adjustment of the noise level or interference signal on entry of communicator and connectivity control of the radio network nodes. Main difference of current intellectual system is mechanism of data/knowledge storage and processing (knowledge base block) for efficient activities in uncertain (lack of information) and random circumstance. The knowledgebase contains the control system, it's goals and management principles, decision making structure and the control object itself. The control system can be contributed with learning sub-system, that generalizes the accumulated experience, which is show on pic [55].

The subsystem for control, gathering, storage and processing of data measures mobile nodes and general radio network parameters. The decision making subsystem was build thinking about unification of control functions into independent groups to separate network management on subsystems and ensure easier math modeling of network management. The new gradient approach of self-adapted radio network was proposed, that differs from known methods by gradient setting of neighboring nodes weight and search of close path in network affected by interference.

Dijkstra algorithm is a search procedure of the shortest path at weighted oriented graph. Algorithm works by steps, starting from first radio network node: on each step it refers to one node, and reduces marks and stops execution when all radio network nodes are visited. Dijkstra algorithm is resourceful, but given the knowledge of network topology and path to necessary peak, the router always knows an alternative route to the required node, in case of fall of any node of the path. Self-learning is a key feature for solving complex problems, that cannot be solved in usual way. The difficulty of constructing such network is to choose invariant features for describing of input data so the differences are caused only by random factors, such as noise. In this case, the informative features will be the vector representation of the symbols on which the noise component or interference was applied. Among the major types of neuro networks, including deep learning networks, the BP (back propagation) structure of neuro network is widely used, because it has features of self-adaptation, and recognition is computation-efficient. The algorithm of non-linear optimization (Levenberg–Marquardt algorithm) which is applied for search of minimal strategy – linear approximation and gradient descent.

According to the simulation procedure, we determine the neural network BP with three layers. The initial structure has two layers, the number of neurons in the first

layer is 33, and in the second - 27, which corresponds to the number of network outputs. The network training function allows to assess the quality of network configuration by constructing a regression line in which the proportionality factor allows to determine the degree of correlation between input and output data. In this case, there is a high degree of correlation between input and output data, $R = 0.999$. Training in this example results in an error of $1.52 \cdot 10^{-5}$, due to the complexity of the output data. The learning took only eight epochs.

The BP multilayer neural network self-adapting algorithm is a controlled algorithm. In fact, it's an iterative method of gradient search for the best parameters in these conditions, which is characterized by the simplicity of the classification task in terms of "input-output" and reliability. New results of radio network modeling are obtained. On the one hand, they differ from the known ones in that the radio network modeling is performed on the basis of gradient learning algorithm. On the other hand, the results are confirmed by theoretical researches and practical results.

The proposed geo information technology of automated data processing with a graphical representation of the radio network topology using the geographic information system ArcGIS-10 of the American company ESRI, which allows to assess the stability of the network structure in dynamic change and identify the limits of stable connectivity of radio switching nodes. This approach is a new variation that expands the boundaries of solving the problem of traffic distribution and noise immunity of the radio network, taking into account the structure of the network topology. The practical significance of the obtained simulation results and experimental research confirmed the correctness of the proposed solutions and the obtained theoretical results.

Keywords: technology of modeling of self-adapting radio network; networks in conditions of interference; topology with elements of learning; tensor analysis; graph models; gradient learning algorithm; shortest path search in network.

Підписано до друку 12.03.2021 р.
Формат 60x84 1/16. Обсяг 0,9 др. арк.
Тираж 100 прим. Зам. № 12-1.

Віддруковано у НАУ
проспект Любомира Гузара, 1, Київ, 03058
тел.(044) 406-79-01

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 977 від 05.07.2002 р.