

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

Перепеліцин Сергій Олександрович

УДК 043.3; 043.5

**ТЕХНОЛОГІЯ НАЛАШТОВУВАННЯ РАДІОМЕРЕЖІ В УМОВАХ  
ЗАВАД ІНТЕГРАЦІЄЮ МАРШРУТИЗАЦІЇ ТА САМОНАВЧАННЯ**

05.13.06 – інформаційні технології

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело



Перепеліцин С.О.

Науковий керівник:

Кучеров Дмитро Павлович, доктор технічних  
наук, старший науковий співробітник

Цей примірник дисертаційної роботи ідентичний за змістом з іншими, поданими до спеціалізованої вченої ради Д 26.062.01

Учений секретар спеціалізованої вченої ради Д 26.062.01, к.т.н., доц.



Т.О. Охрімeнko

Київ – 2021

## 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.

Дисертаційну роботу присвячено розв'язанню науково-технічного завдання зі створення інформаційної технології моделювання ефективного контролю за топологією однорангової мобільної самоналагоджувальної радіомережі тактичного рівня і керування зміною показників її функціонування в умовах впливу радіозавад та радіоелектронної протидії.

У дисертаційній роботі вперше запропоновано нову топологію, яка відрізняється від відомих тим, що включає елементи навчання поведінки мережі в умовах завад. Уведено нові процеси інтелектуальної системи керування вузлом мобільної радіомережі: пошукове налаштування рівня шумів або сигналу завади на входному тракті комунікатора та контроль зв'язності комутації вузлів мобільної радіомережі. Головна особливість, яка відрізняє запропоновану інтелектуальну систему керування від побудованої за традиційною схемою, полягає у підключенні механізмів зберігання й оброблення знань (блок база знань) для реалізації здатності виконувати необхідні функції в умовах невизначеності (неповноти інформації) за випадкового характеру зовнішніх впливів. У базі знань міститься інформація про принципи побудови системи керування та мету її функціонування, специфіку використання різних методів керування, а також особливості функціонування підсистеми реалізації рішень та самого об'єкта керування. До складу системи керування, у разі потреби, може входити також підсистема поповнення знань та навчання, яка забезпечує узагальнення нагромадженого

досвіду і, таким чином, база поповнюється новими знаннями, це показано в [55]. Підсистема контролю, збирання, оброблення та зберігання даних призначена для вимірювання контрольованих параметрів мобільних вузлів та радіомережі в цілому. Підсистему формування рішень побудовано за принципом функціональності управління, який передбачає об'єднання функцій системи керування у відносно незалежні групи, що дозволяє виконати декомпозицію керування мережею на підсистеми (що значно спрощує розроблення математичного забезпечення керування).

Запропоновано новий метод самоналаштування радіомережі на основі градієнтного підходу, що відрізняється від відомих інтеграцією градієнтного алгоритму налаштування ваги сусідніх вузлів і пошуку найкоротшого маршруту в мережі, що зазнає впливу завад. Алгоритм Дейкстри є процедурою пошуку найкоротшого шляху на зваженому орієнтованому графі. Алгоритм працює покроково, починаючи з першого вузла радіомережі: на кожному кроці він «відвідує» один вузол і намагається зменшувати мітки і закінчує роботу, коли всі вузли радіомережі відвідані. Алгоритм Дейкстри є ресурсомістким, але завдяки знанням топології радіомережі і шляху до потрібної вершини маршрутизатор завжди знаходить альтернативний шлях до потрібного вузла мережі у випадку виникнення збоїв у будь-якому вузлі визначеного шляху.

Самонавчання є ключовим для розв'язання складних проблем, які неможливо вирішити звичним способом. Проблема побудови такої мережі полягає у виборі інваріантних ознак, для опису вхідної інформації так, що різниці викликаються лише випадковими факторами, наприклад, шумом. У цьому разі інформативними ознаками вважатиметься векторне подання символів, на які накладено компонент шуму або навмисної завади. Серед багатьох типів нейронних мереж, включаючи глибинне навчання, широко використовується структура нейронної мережі ВР (back propagation), оскільки вона має властивості самоналаштування, а розпізнавання є обчислювально ефективним, використовується також метод нелінійної оптимізації (Левенберга

– Марквардта), який застосовується для пошуку мінімально комбіновану стратегію – лінійну апроксимацію та градієнтний спуск. За процедурою моделювання ми визначаємо нейронну мережу BP з трьома шарами. Початкова структура має два шари, кількість нейронів у першому шарі становить 33, а у другому – 27, що відповідає кількості мережевих виходів. Функція мережевої підготовки дозволяє оцінити якість мережевого налаштування шляхом побудови лінії регресії, у якій коефіцієнт пропорційності дозволяє визначити ступінь кореляції між вхідними та вихідними даними. У розглянутому випадку наявний високий ступінь кореляції між вхідними та вихідними даними,

$R = 0,999$ . Навчання в цьому прикладі закінчується помилкою  $1,52 \cdot 10^{-5}$ , що пояснюється складністю вихідних даних. Для навчання знадобилося лише вісім епох. Алгоритм самоналаштування багат шарової нейронної мережі BP є керованим алгоритмом. Насправді це ітеративний метод градієнтного пошуку найкращих параметрів у даних умовах, що характеризується простотою класифікаційного завдання з точки зору «вхід–вихід» та надійністю роботи.

Отримано нові результати моделювання радіомережі, які відрізняються від відомих тим, що моделювання радіомережі виконано на основі градієнтного алгоритму навчання, і які підтверджуються теоретичними дослідженнями та практичними результатами.

Запропоновано геоінформаційну технологію автоматизованого оброблення даних з графічним зображенням топології радіомережі за допомогою геоінформаційної системи ArcGIS-10 американської компанії ESRI, яка дає змогу оцінити стійкість мережевої структури в динамічній зміні та виявити межі стійкої зв'язності вузлів комутації радіомережі.

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



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

**Публікації:** Всього за тематикою дослідження опубліковано 14 наукових праць, з них 1 стаття за кордоном, що входить до міжнародної наукометричної бази видань Scopus, 5 статей у виданнях, які зазначені в переліках фахових видань України з технічних наук; 8 публікацій у матеріалах конференцій (1 включено до наукометричної бази даних SCOPUS), 4 авторські свідоцтва СРСР на винаходи.

## **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

*в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:*

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. pp.1121–1127.(Входить до міжнародної наукометричної бази SCOPUS).

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.

*які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:*

7. Kuchеров 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, pp. 6-9. (Входить до міжнародної наукометричної бази SCOPUS).

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 індустріальних 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.

## ABSTRACT

**Serhiy Perepelitsyn. Technology of setting up a radio network in the conditions of interference with the integration of routing and self-learning.** – Scientific research as 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, its goals and management principles, decision making structure and the control object itself. The control system can be contributed with learning subsystem, 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.

## LIST OF PUBLISHED PAPERS ON THE TOPIC OF THE DISSERTATION

in which the main scientific results of the dissertation are published:

1. Perepelitsyn S., Lesko O. The use of ultra-wideband signal technology and self-tuning network in the management of military UAVs / Bulletin of the Engineering Academy of Ukraine.K. NAU. - № 4, 2019, p.28–34.

2. Perepelitsyn S. UAV strike protection system using neural network analysis blocks / Science-intensive Technologies. – K.NAU. - №1 (45), 2020, p.19–27.

3. Perepelitsyn S.O. Analysis of the possibility of using cloud computing in military wireless control networks of the tactical level. - Modern special equipment. - K. № 2 (61), 2020, p.47–58.

4. Naritnyk TM, Korsun VI, Korsak VF, Borisko AV, Vovkotrub AV Perepelitsyn SO 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. pp.1121–1127. SCOPUS bases).

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. Slyusar V., Perepelitsyn S. Application of the end product of matrices in problems of analysis of topologies of routing of multilevel networks.// Weapons and military equipment. - №1. - 2021 - p. 56-63.

which certify the approbation of the dissertation materials:

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, pp. 6-9. (Included in the international scientometric database SCOPUS).

8. Slyusar V., Perepelitsyn S. Analysis of the topology of multi-rank networks based on the end product of matrices / International scientific and technical

conference "Radio fields, signals, devices and systems". - K. KPI them. Igor Sikorsky, 16–22.11. 2020 Kyiv, Ukraine, p. 114-116.

9. Slyusar V., Perepelitsyn S., Pisarenko R. Influence of topology on the configuration of mobile multi-level networks./ XII International scientific-practical conference "Advancing in research and education", 07–10.12. 2020, La Rochelle, France, p. 558-563.

10. Perepelitsyn S.O. "Prospective development of combined automatic stationary electronic means of protection with dynamic multimedia display of information" / Report at the International Forum "Physical and Nuclear Safety", Kiev, 2005, p. 170-171.

11. Perepelitsyn S.O. "Development of models and networks of physical protection of strategic and large industrial spaced objects on the basis of image information display systems and spatially distributed dynamic sensors" / Report at the International Forum "Physical and Nuclear Safety", Kyiv, 2006, p. 104-126.

12. Perepelitsyn S.O. "Third millennium: new threats - thinking, ideas, models, installations of security systems of high-risk industrial facilities", Report at the International Forum "Physical and Nuclear Security", Kyiv. - 2007, p. 98-104.

13. Zinchuk BE, Perepelitsyn S.O. "Synthesis and analysis of multichannel autocompensator interference based on the methods of Markov's theory of nonlinear filtering" / Report at the scientific conference, Research Institute "Arrow" Tula, 03-04.-1989, is not publicly available.

14. Zinchuk BE, Perepelitsyn S.O. "Increasing the secrecy of the radar based on the use of the properties of dynamic antennas" / Report at a scientific conference, Research Institute "Arrow", Tula, 04.1989, is not publicly available.

## ЗМІСТ

Вступ	17
Розділ 1. Доцільність застосування самоналагоджувальних радіомереж	23
1.1. Класифікація та порівняльний аналіз існуючих радіомереж	23
1.2. Аналіз типових структур мобільних радіомереж	37
1.3. Формулювання завдань дослідження	50
Висновки за розділом	53
Розділ 2. Інтелектуалізація радіомережі	56
2.1. Дослідження методів штучного інтелекту, що існують в системі підтримання прийняття рішень щодо керування радіомережами	56
2.2. Удосконалення методу аналізу топології радіомережі	65
Висновки за розділом	71
Розділ 3. Налаштовування радіомережі	73
3.1. Інформаційна технологія самоналагоджувальної радіомережі тактичного рівня	73
3.2. Самоналагоджувальна радіомережа в умовах завад	79
Висновки за розділом	98
Розділ 4. Моделювання та експериментальне дослідження радіомережі	100
4.1. Моделювання зміни топології мережі	100
4.2. Аналіз завадостійкості мобільної радіомережі залежно від топології (конфігурації) на місцевості	105
4.3. Аналіз завадостійкості мобільної радіомережі з круговою конфігурацією на місцевості в залежно від кількості вузлів.	116
4.4. Фізична модель (робочий прототип) цифрової радіостанції PRR та узагальнена модель самоналагоджувальної радіомережі	130
Висновки за розділом	132
Висновки	135
Перелік джерел посилання	136
Додаток А: Копії документів підготовки дисертаційної роботи здобувача періоду КВІРТУ ППО (1989 р.)	146
Додаток Б: Копії документів з фізичної моделі (робочого прототипу) цифрової радіостанції PRR	149
Додаток В: Авторські свідоцтва СРСР на винаходи	153
Додаток Г: Акт про впровадження результатів дисертаційного дослідження.	157
Додаток Д: Програмна реалізація ітераційного методу градієнтного пошуку.	160
Додаток Е: Топологія — моделювання та методика евристичного аналізу.	166



## СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

АСУ	–	автоматизована система управління
БПЛА	–	безпілотний літальний апарат
ГІС	–	геоінформаційна система
ГПІС	–	геоінформаційна підсистема
ІА	–	інтелектуальна програма - агент
ІСК	–	інтелектуальна система керування
КХ	–	короткохвильові системи зв'язку
МДКН	–	множинний доступ з контролем несучої сигналу
МК	–	мобільна компонента мереж зв'язку і управління військового призначення
Модель OSI	–	мережева модель стека мережевих протоколів OSI / ISO
ПЗ	–	програмне забезпечення
УКХ	–	ультракороткохвильові системи зв'язку
ЦКУ	–	центр контролю та управління
ШПІС	–	шумоподобні сигнали
ABCS	–	Army Battle Command System
AES-64	–	Advanced Encryption Standard
АМ-ФМ	–	Амплітудна та фазова модуляція
AMPS	–	Advanced Mobile Phone Service
AMTS	–	Automated Motorized Total station
ANW2C	–	режим р/ст. використовує технології Ad Hoc та TDMA, можливе одночасне передавання голосу та даних
ARQ	–	Automatic Repeat Request
API	–	Application Programming Interface
APCO 25	–	система зв'язку з відкритою архітектурою (Motorola)
ARQ	–	Automatic Repeat ReQuest
ATM	–	Asynchronous Transfer Mode ( асинхронний спосіб передавання даних)
AUC	–	Authentication Center
A2C2S	–	Army Airborne Command and Control System
BFT	–	Blue Force Tracking
BSC	–	Base Station Controller
BSS	–	Basic Service Sets
BTS	–	Base Transceiver Center
C4ISR	–	концепція (Command, Control, Communications, Computers, Intelligence, Surveillance and Reconnaissance)
CDMA	–	Code Division Multiple Access
CRC	–	Cyclic Redundancy Check (циклічний надмірний код)
CSD	–	Circuit Switched Data
D-AMPS	–	Digital Advanced Mobile Phone System
DARPA	–	агентство перспективних досліджень міноборони США

DCS1800	– стандарт зв'язку
DECT	– Digital Enhanced Cordless Telecommunication (технологія цифрового бездротового зв'язку)
DMO AI	– Радіоінтерфейс прямого режиму роботи
DSSS	– Direct Sequence Spread Spectrum
EDACS	– Enhanced Digital Access Communications System (удосконалена система радіозв'язку з цифровим радіодоступом фірми Ericsson)
EDGE/EGPRS	– Enhanced Data rates for GSM Evolution
EIR	– Equipment Identity Register
EPLRS	– Enhanced Position Location Reporting
ESS	– Extended Service Cets
FBCB2	– Force Battle Command Brigade and Below
FDMA	– Frequency Division Multiple Access (множинний доступ з поділом каналів за частотою)
FHSS	– Frequency Hopping Spread Spectrum
FLC	– Field Logic Controller (контролер польової логіки )
GPRS	– General Packet Radio Service
GPS	– Global Positioning System
GSM	– Global System for Mobile Communications
HLR	– Home Location Register
HMMWV	– High Mobility Multipurpose Wheeled Vehicle
HNR	– Highband Networking Radio
HNW	– Highband Networking Waveform
HSDPA	– High-Speed Downlink Packet Access
HSCSD	– High-Speed Circuit-Switched Data
HSPA	– High Speed Packet data Access
HSUPA	– High Speed Uplink Packet Access
IBSS	– Independent Basic Service Sets
iDEN	– Integrated Digital Enhanced Network (технологія фірми Motorola)
IEEE	– Institute of Electrical and Electronics Engineers
IMSI	– International Mobile Subscriber Identity
IMTS	– International Manufacturing Technology Show
ISDN	– Integrated Services Digital Network
ISI	– інтерфейс з іншими системами
IST WSI	– The Wireless Strategic Initiative
JBC-P	– Joint Battle Command-Platform
JCR	– Joint Capabilities Release
JDC	– японський стандарт стільникового зв'язку
JNN-N	– Joint Network Node Network
JTRS	– Joint Tactical Radio System
JWICS	– Joint Worldwide Intelligence Communications System
LAN	– Local Area Network

LoRa	– Long Range (метод модуляції в бездротових мережах LPWAN і відкритий протокол LoRaWAN)
LPWAN	– Low Power Wide Area Networks
LSI	– інтерфейс з віддаленим диспетчером
LTE	– Long-Term Evolution (маркетингова назва 4G LTE)
MAC-адрес	– Media Access Control (керування доступом до посередників)
MAN	– Metropolitan Area Network
MANET	– Mobile Ad hoc Network
Mesh-network	– Network Topology of a Computer Network (комп'ютерні бездротові мережі з комірчастою структурою)
MIMO	– Multiple Input/Multiple Output
MMI	– Man-Machine Interface (інтерфейс користувача)
MPT 1327	– стандарт аналогової транкінгової радіозв'язку
MSC	– Mobile Switching Center
MSE	– Mobile Subscriber Equipment
MTS	– Movement Tracking System
NATO	– North Atlantic Treaty Organization
NBNR	– Narrow Band Networking Radio
NB-IoT	– Narrow Band Internet of Things (вузькосмуговий інтернет речей)
NIPRNet	– Non-classified Internet Protocol (IP) Router Network (мережі маршрутизації неконфіденційного IP-трафіку МО США)
NMI	– Non-Maskable Interrupt (інтерфейс керування мережею)
NMT	– Nordic Mobile Telephony
NCSA	– Communication and Information Systems Services Agency NATO
NACOSA	– Communication and Information Systems Operating and Support Agency NATO
OFBCS	– Objective Force Battle Command System
OFDM	– Orthogonal Frequency- Division Multiplexing
OFDMA	– Orthogonal Frequency-Division Multiple Access
OMC	– Operation and Maintenance Center
OQPSK	– Quadrature Shift Phase Shift Keying
QAM	– Quadrature Amplitude Modulation
PAN	– Personal Area Network
PDC	– Personal Digital Cellular
PDN	– Public Data Network (мережа загального доступу)
PSTN	– Public Switched Telephone Network
PTT	– Push-to-talk
QoS	– Quality of Service (набір методів для керування ресурсами пакетних мереж)
SCA	– Software Communications Architecture

SIGFOX	– Global Network for the Internet of Things (для IoT-пристроїв)
SNE	– Soldier Network Extension
SDK	– Software Development Kit (набір із засобів розроблення програмного забезпечення)
SDR	– Software-Defined Radio
SIPRNet	– Secret Internet Protocol Router Network (система взаємопов'язаних комп'ютерних мереж МО та Держдепу США)
SwMI	– Switching and Management Infrastructure
TCN	– Tactical Communication Node
TD-SCDMA	– Time Division Synchronous Code Division Multiple Access (китайський стандарт мобільних мереж третього покоління)
TDMA	– Time Division Multiple Access (метод часового поділу одного фізичного каналу зв'язку)
TETRA	– TERrestrial Trunked RAdio (відкритий стандарт цифрового професійного рухомого радіозв'язку)
Tetrapol PAS	– Publicly Available Specifications (стандарт транкінгового зв'язку фірми Matra Communication)
TMO AI	– Trunked Mode Operation (системний радіоінтерфейс)
TVWS	– TV White Space
UMTS	– Universal Mobile Telecommunications System
UNB	– Ultra Narrow Band
UWB	– Ultra-Wide Band (надширока смуга)
VANET	– Vehicle Ad-hoc Networks (автомобільні мережі зв'язку)
VLR	– Visitor Location Register
VMS	– Voice Messaging Center
VPN	– Virtual Private Network
VSAT	– Very Small Aperture Terminal
VWP	– Vehicle Wireless Package
WAN	– Wide Area Network
WBNR	– Wide Band Networking Radio
Weightless P(N,W)	– low-power, high-performance networks (технологія підключення LPWAN для Інтернету речей)
WGS	– Wideband Global SATCOM
Wi-Fi	– Wireless Fidelity - торгова марка Wi-Fi Alliance
WiDEN	– стандарт 2G - iDEN (заснований на TDMA)
WiMAX	– Worldwide Interoperability for Microwave Access
WIN-T	– Warfighter Information Network-Tactical (ЗС США)
WLAN	– Wireless Local Area Network
WSN	– Wireless Sensor Network

## ВСТУП

*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 MIMO (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 з 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 (копії дод. А).

### **Мета та завдання дослідження.**

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

Досягнення поставленої мети передбачає вирішення таких **завдань 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’єкт дослідження:** є функціонування радіомережі в умовах дії радіозавад.

**Предмет 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.

#### **Практична значущість отриманих результатів.**

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 завад.

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 завад, 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 (робочий прототип, Дод.Б); 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) [14, 15]; 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 завадостійкості та функціонування не задовольняють вимоги функціонування вузла або мобільної радіомережі [14,15,66,93]; 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 [50, 97, 98]; 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 завадозахисту) – проведено дослідження в галузі статистичного синтезу оптимальних просторово-часових фільтрів та аналізу просторово-часових фільтрів; виготовлено макет просторово-часового фільтра і проведено натурні випробування швидкодії та глибини придушення фільтра [74–76]; виконано дослідження за науково-дослідними роботами шифру «Сіріус» [12], шифру «Тюльпан» [13] 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 [77] – 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 [94 – 96]; 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 Шевченка на кафедрі геоінформаційних систем (Акт від 03.12.20 p.) та у ДКР «Гіацинт» у ТОВ «ЕСОММ» (Акт від 09.12.20 p.)(дод. Г).

**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.

## Розділ 1

# ДОЦІЛЬНІСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ САМОНАЛАГОДЖУВАЛЬНИХ РАДІОМЕРЕЖ

### 1.1. Класифікація та порівняльний аналіз існуючих радіомереж

Основною тенденцією розвитку систем зв'язку протягом останніх двох десятиліть є мобільність. У проєкт IST WSI (<http://www.ist-wsi.org/>) закладено основу концепції, згідно з якою мобільний зв'язок, з позиції користувача, можна подати у вигляді декількох сферичних рівнів. Перший рівень дозволяє користувачеві через бездротові системи передавання даних об'єднувати в одну персональну радіомережу всі побутові пристрої (мобільний телефон, годинник, планшет і т.ін.). Другий рівень дає змогу йому поєднувати в локальну радіомережу свої мобільні пристрої з пристроями його найближчого оточення (наприклад, з комп'ютерами, телевізорами у своєму офісі). Третій рівень дозволяє комутуватися в локальну мережу з іншими партнерами з мобільними радіотерміналами, з радіомодемом транспортних засобів і обмінюватися інформацією, а четвертий комунікуватися через радіомережі мобільних операторів, мережі кабельного зв'язку і супутникові глобальні комунікації – це вільний вихід у глобальні мережі. Ця загальноновизнана модель отримала назву – «користувацька центристська» [1].

Розвиток бездротового зв'язку, – це безперервна зміна технологій, в основі яких лежать стандарти зв'язку GSM і CDMA, а також стандарти систем передавання даних IEEE 802. IEEE 802.11 – набір стандартів зв'язку для комунікації через бездротову локальну мережеву зону частотних діапазонів 0,9; 2,4; 3,6; 5 і 60 ГГц.

Для доступу до середовища, у якому відбувається обмін даними, у бездротових радіомережах застосовують метод колективного доступу з виявленням опорної частоти й уникненням колізій (Carrier Sense Multiple

Access/ Collision Avoidance, CSMA/CA). Протоколи фізичного рівня для 802.11 ґрунтуються на принципах розширення спектра прямою послідовністю – DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) і псевдовипадковою перебудовою частоти - FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum) . Стандарти та відповідні технології бездротових мереж наведено у табл.1.1 [2].

Таблиця 1.1

## Стандарти і відповідні технології бездротових мереж

Стандарт	Технології
0G	PTT • MTS • IMTS • AMTS • Mobitex • Autotel/PALM • ARP
1G	NMT • AMPS • Нісар
2G	GSM • iDEN • D-AMPS • IS-95 • PDC • CSD • GPRS • HSCSD • WiDEN
2.75G	EDGE/EGPRS • CDMA2000 (1xRTT)
3G	UMTS (W-CDMA • FOMA) • CDMA2000 (1xEV-DO/IS-856) • TD-SCDMA • WiMAX
3.5G	UMTS (HSPA • HSDPA • HSUPA) • CDMA2000 (EV-DO Rev.A)
3.75G	UMTS (HSPA+) • CDMA2000 (EV-DO Rev.B/3xRTT)
4G	WiMAX • LTE

Вимоги, які є типовими для всіх радіомереж, це широкосмуговість, висока пропускна здатність, максимально можливе покриття залежно від потужності сигналу передавача і чутливості приймача, зв'язаність підключених станцій та ін.. Використання IP-протоколу стало можливим і доцільним тільки після досягнення швидкостей обміну даними в радіомережі понад 19,2 кбіт/с. Підвищення швидкості обміну пов'язано з вирішенням ряду технічних завдань. Збільшення швидкості обміну даними потребує додаткових енергетичних витрат. Сучасні рухомі вузькосмугові радіомережі обміну даними будуються на спеціалізованому обладнанні. Функціонування таких радіомереж організовується найчастіше на базі IP-протоколу, що забезпечує їх сумісність з будь-яким програмним забезпеченням, що підтримує цей протокол [3].

Взаємозв'язок швидкості обміну даними і співвідношення сигнал / шум був описаний теоремою Шеннона (1.1), що підтверджується розрахунками, виконаними за такою формулою [3]:

$$C = B \log_2(1 + S / N), \quad (1.1)$$

де:  $C$  - пропускна здатність каналу (в біт/с);  $B$  - смуга пропускання каналу каналу (Гц);  $S / N$  - співвідношення сигнал / шум.

Навіть не виконуючи операцію з логарифмами, можна легко помітити, що якщо співвідношення сигнал / шум дорівнює 1, пропускна здатність каналу дорівнює  $B$ , а якщо співвідношення сигнал / шум дорівнює 3, то пропускна здатність каналу дорівнює  $2B$  або подвоюється. Інакше кажучи, зі збільшенням співвідношення сигнал / шум збільшується пропускна здатність каналу передавання даних. І навпаки, зі зменшенням співвідношення сигнал / шум пропускна здатність каналу зменшується.

Відношення енергетичних витрат на один біт даних в залежно від рівня шуму можна визначити за формулою (1.2) [3]:

$$E_b / N_0 = (S / N) (W / R) \quad (1.2)$$

де  $S / N$  - співвідношення сигнал / шум опорної частоти;  $W$  - ширина каналу в Гц;  $R$  – швидкість передавання даних [3].

Для спрощення розрахунків можна припустити, що значення  $S/N=1$  і  $WR = 1$ . У цьому випадку значення  $E_b/N_0=1$ . У разі подвоєння швидкості передавання  $R$  до  $2R$ , значення  $E_b/N_0$  становитиме 0,5. У децибелах (потужність сигналу) отримуємо значення 3 дБ. Таким чином, на передавання одного біта даних губляться 3 дБ. Для досягнення однакової продуктивності системи необхідно збільшити значення співвідношення сигнал/шум на 3 дБ, або збільшити ширину каналу до  $2B$ , тобто подвоїти її. Якщо  $E_b/N_0$  не збільшується, то це призводить до збільшення можливих помилок під час передавання. Для забезпечення заданої кількості мінімальних можливих помилок у разі збільшення швидкості передавання необхідно збільшити ширину каналу або потужність сигналу, або обох параметрів одночасно. Оскільки ширина каналу є

величиною сталою, єдиним способом домогтися необхідного значення можливих помилок під час передавання є збільшення співвідношення сигнал/шум. У цьому випадку для компенсації втрат, наприклад 8 дБ, теоретично необхідно підвищити потужність сигналу у 6,3 разу, тобто, якщо в системі зі швидкістю обміну даними 4,8 кбіт/с задовільна робота забезпечується передавачем потужністю 25 Вт, то для роботи з такою ж достовірністю доведення даних на швидкості 19,2 кбіт/с потрібен передавач потужністю понад 150 Вт. Як впливає з наведених вище розрахунків, збільшення потужності передавача не може вважатися ефективним рішенням. Одним з досить простих рішень є збільшення кількості базових станцій зі зменшенням оперативної зони кожної з них (як це робиться в стільниковому зв'язку). Тоді втрати потужності сигналу під час передавання знижуються, оскільки мобільні користувачі передують на найближчій відстані від базової станції. При цьому для розглянутого вище варіанта, у якому втрати потужності сигналу становлять 8–9 дБ, кількість базових станцій, які зможуть забезпечити роботу в заданій зоні зі швидкістю 19,2 кбіт/с, має бути збільшено в чотири рази порівнянно з аналогічною системою, що працює зі швидкістю 4,8 кбіт/с [3]. Вузькосмугові пристрої випромінюють сигнал із шириною спектра 12,5–200 кГц, причому ширина випромінюваного спектра збільшується зі збільшенням швидкості передавання інформації. Ці системи мають істотний недолік: з появою в частотному діапазоні такої системи завади – якість зв'язку різко знижується.

Незахищеність від завад вузькосмугових систем спонукала до розроблення, спочатку для військових застосувань, систем з широкосмуговими сигналами (ШСС–технологія). Системи на основі шумоподібних сигналів мають такі переваги: високу захищеність від завад; низьку потужність сигналу, що дозволяє не створювати завади іншим пристроям; високу прихованість передавання даних (цифрового потоку); високу швидкість передавання сигналу; невисоку вартість у разі масового виробництва через дешевші високочастотні

компоненти обладнання, а також застосування шумоподібного сигналу дозволяє працювати в діапазонах, які зайняті іншими системами радіомережі. Ідея технології широкопasmового сигналу полягає в тому, що для передавання інформації використовується значно ширша смуга частот, ніж це потрібно для передавання у вузькосмуговому каналі. Стандарт 802.11 для отримання шумоподібних сигналів передбачає метод прямої послідовності DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) і метод частотних стрибків FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum) [4].

Зупинимося на застосуванні та розвитку радіомереж у військовій сфері, яка задає вектор і темп розвитку радіомереж тактичного рівня. Мобільна телекомунікаційна радіомережа тактичного рівня провідних країн світу становить структуру типу «решітка» або «стілники» в основі якої є автоматизовані опорні комунікаційні вузли, які з'єднані між собою радіорелейними лініями або ретрансляторами з різними зонами покриття залежно від використовуваного частотного діапазону. До опорних вузлів підключаються автоматизовані вузли доступу, які є вузлами зв'язку пунктів керування, та пункти радіодоступу, які забезпечують вихід абонентів бойових радіомереж на мобільні та стаціонарні опорні телекомунікаційні мережі.

Основними тенденціями розвитку і модернізації військових систем та засобів зв'язку і керування провідних країн є: забезпечення високої мобільності, живучості, захищеності та пропускну здатності; сумісність із мережами загального користування національних систем зв'язку, мережами зв'язку інших військових формувань і коаліційних військ під час виконання спільних завдань; інтеграція усіх видів зв'язку та автоматизація основних процесів інформаційного обміну і керування; інтеграція декількох функцій в одному технічному пристрої; уніфікація та стандартизація засобів і комплексів зв'язку; упровадження перспективних засобів криптографічного захисту інформації; освоєння нових діапазонів частот. Шляхи й напрями розвитку військових інформаційних систем доцільно визначати з урахуванням тенденцій

розвитку систем військового зв'язку та керування провідних країн світу (США, Великобританії, Німеччини, Франції, Італії та ін.) та армій країн Східної Європи (Польщі, Болгарії, Румунії та ін.), а також тенденцій розвитку державних і комерційних мереж загального користування.

Основою для створення ad-hoc мереж є високий рівень «інтелектуальності» сучасних радіотерміналів, що містять, крім приймально-передавальних блоків досить продуктивні обчислювальні засоби – процесор, пам'ять великої ємності, що дозволяє реалізовувати складні алгоритми. Мережі ad-hoc складаються з бездротових вузлів. Під вузлом мережі розуміється бездротовий комунікатор (пересувний комп'ютер, персональний секретар, транспортний засіб, сенсорний пристрій, робот та ін.), який укомплектований радіомодемом. Відмітною особливістю кожного вузла є його здатність виконувати функції як кінцевого пристрою, тобто джерела і приймача інформації, так і маршрутизатора інформаційних і службових пакетів інших абонентів радіомережі. Вузли мережі можуть бути як стаціонарними, так і мобільними, однорідними або неоднорідними (відрізняються потужністю передавача, ємністю власної батареї, продуктивністю процесорів тощо), а також можуть розміщуватися на місцевості. При цьому процес передавання інформації в таких мережах здійснюється без будь-якого центра керування. Це означає, що кожен вузол повинен самостійно виконувати певний набір функцій керування передаванням інформації в мережі. Відсутність постійної інфраструктури та децентралізованого керування є характерними рисами самоналагоджувальних радіомереж. Сферами застосування мереж ad-hoc є, в першу чергу, мережі зв'язку військового призначення тактичного рівня, а також мережі, що розгортаються в умовах надзвичайних ситуацій чи природних катаклізмів. Цивільними сферами застосування є: домашні мережі та мережі підприємств, сенсорні (телеметричні) мережі різного призначення, мережі контролю та диспетчеризації транспортних засобів, мережі, які створюються у віддалених районах, де відсутня стаціонарна інфраструктура або її побудова



недоцільна [5].

Сфери застосування самоналагоджувальних радіомереж наведено в табл. 1.2.

Таблиця 1.2

## Сфери застосування самоналагоджувальних радіомереж [5]

Сфера	Призначення
Тактичні мережі	Мережі військового призначення, в основному тактичного рівня
Сенсорні мережі	Домашнього, промислового і військового застосування, призначені для моніторингу навколишнього середовища: пересування тварин; хімічний, біологічний аналіз рослин для сільського господарства; динаміка погодних умов; переміщення противника тощо.
Аварійні мережі	Пошукові і рятувальні операції. Заміна фіксованих мереж у випадку стихійного лиха (землетрус, ураган і ін.)
Комерційні мережі	Електрона комерція, наприклад електронний платіж у будь-якому місці (наприклад таксі). Бізнес: динамічний доступ користувача до бази, мобільний офіс. Сервіс під час переміщення на транспортному засобі: зведення новин, відомості про стан дороги та ін..
Домашні мережі і мережі підприємств	Бездротові домашні мережі для різних додатків. Персональні мережі.
Мережі навчання	Віртуальні класи, приміщення для проведення конференцій тощо.
Розважальні мережі	Ігри з багатьма гравцями, домашні роботи, зовнішній доступ до Інтернету
Позиційний сервіс	Інформаційні послуги: автоматична переадресація виклику, координати заправної станції та ін..

Радіомережі можна класифікувати, як і мережеві системи радіозв'язку, формувалися протягом десятків років; за еволюційною ознакою існує три їх типи: аналогові (системи радіозв'язку довгохвильові, короткохвильові, ультра-короткохвильові та супутникові; цифрові; універсальні (системи професійної

транкінгового радіозв'язку або системи супутникового зв'язку минулого покоління).

Розвиток елементної бази й обчислювальні можливості натеper визначає розмаїття самоналагоджувальних радіомереж (рис.1.1 і 1.2):

- Ad-hoc – радіомережа, яка являє собою мережу, що складається з множини мобільних вузлів, основна особливість яких полягає у відсутності централізованої координації або фіксованої інфраструктури. Кожен вузол є не тільки кінцевим користувачем системи, але і, за необхідності, використовується як маршрутизатор для пересилання пакетів інших вузлів. Такі мережі дозволяють оперативно організувати мережеву взаємодію між користувачами на великих площах з незначними витратами [1,5,6].

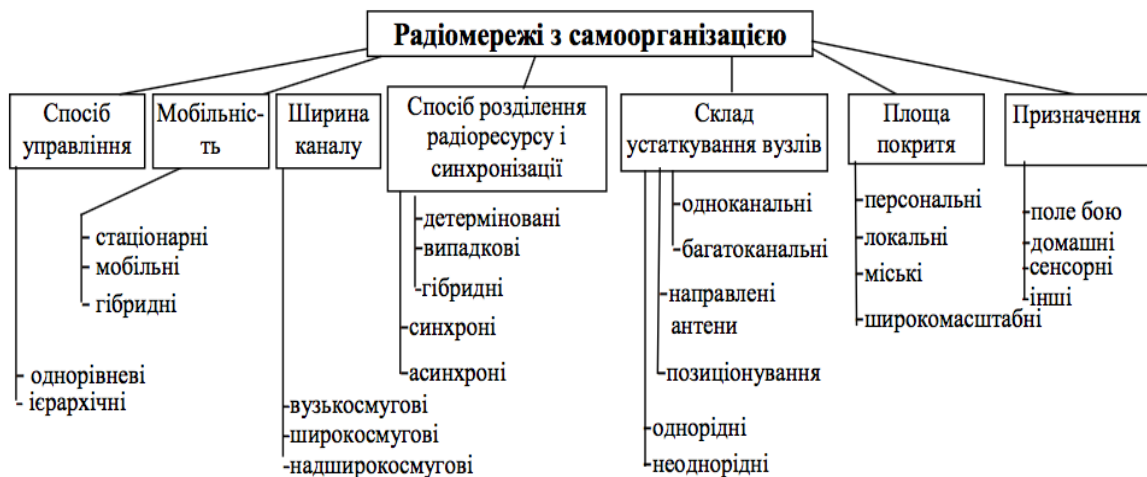


Рис. 1.1 Класифікація радіомереж із самоорганізацією [1]

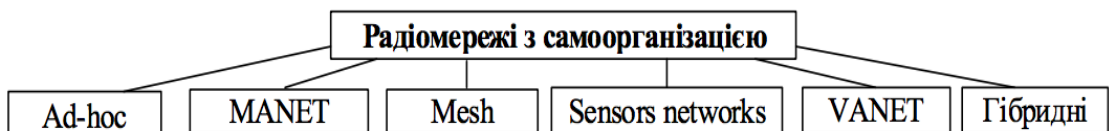


Рис. 1.2 Типи радіомереж із самоорганізацією [6]

- MANET (Mobile Ad-hoc Networks) - радіомережі з динамічною топологією, множиною абонентів, децентралізованим керуванням за відсутності базових станцій або опорних вузлів. Самоорганізовані

мережі MANET мають: можливість передавання даних на великі відстані без підвищення потужності передавача; стійкість до змін в інфраструктурі мережі; можливість швидкої реконфігурації в умовах несприятливих завад; простоту та швидкість розгортання [1,6].

- MESH – мережі, які складаються з бездротових стаціонарних маршрутизаторів (створюють бездротову магістраль і зону обслуговування абонентів) і мобільних/стаціонарних абонентів, що мають доступ (у межах зони радіозв'язності) до одного з маршрутизаторів [1,6].
- WSN (Wireless Sensor Networks) - бездротова сенсорна розподілена, самоорганізовувана радіомережа, яка побудована на множині сенсорів об'єднаних між собою за допомогою радіоканалу. Сенсорні вузли з інтегрованими функціями здатні проводити моніторинг певних параметрів навколишнього середовища, оброблення і передавання даних у радіоканалах [1,6].
- VANET (Vehicle Ad-hoc Networks) - автомобільні мережі зв'язку транспортних засобів, які забезпечують зв'язок між мобільними та стаціонарними об'єктами мережі. Робота автотранспортної бездротової самоорганізовуваної мережі ґрунтується на використанні інтелектуальної системи керування мережею [1,6].

Класифікація радіомереж із самоорганізацією буде не повною, якщо не розглянути відмінності між радіомережею і радіомережею з елементами інтелектуального керування. Прості радіомережі мають статичну архітектуру типу мобільних мереж із фіксованими вузлами – ретрансляторами. Кількість користувачів постійно зростає, що призводить до перевантаження трафіку в пікові години. Іншою проблемою є посилення завад і підвищення рівня шуму в кожній конкретній мережі в місцях великої скупченості абонентів. Бурхливе зростання бездротових мереж призначеного для користувача попиту створює безліч нових серйозних проблем. Ще одна проблема – нерівномірний розподіл пропускної здатності: розділення, що існує для спільного використання смуги

пропускання, не пристосовані для об'єднання каналів. Бездротові локальні мережі не завжди достатньо сумісні зі стільниковими мережами, які використовують інші підходи до керування радіочастотними ресурсами.

Перевантаження вузлів доступу і динамічна природа бездротового середовища ставлять перед користувачами завдання підтримання та підвищення продуктивності бездротової мережі. Розроблено новий стандарт IEEE 802.11k-2008 (radio resource measurement of wireless LANs), призначений для поліпшення розподілу трафіку в мережі. Він надає інформацію про умови радіозв'язку і про доступні мережі, щоб забезпечити оптимальний рівень обслуговування мобільної бездротової локальної мережі. Алгоритм інтелектуального роумінгу, що працює в призначеному для користувача пристрої, дозволяє вибрати оптимальну точку доступу, що забезпечує необхідну пропускну здатність і рівень якості обслуговування [7].

Значну частину досліджень щодо поліпшення роботи бездротових локальних мереж присвячено адаптивному налаштуванню. Адаптивне налаштування дає можливість пристрою оптимізувати свої параметри залежно від характеристик середовища. Наприклад, корпорація Intel створила два динамічні інтелектуальні адаптивні алгоритми, які дають змогу бездротовим пристроям «інтелектуально» реагувати на зміни навколишнього середовища.

Аналіз стандартів (IS-54, IS-41, IS-95A) і протоколів (IPv.4, GSM, MPT 1327, TETRA тощо) стільникового та транкінгового зв'язку, бездротових локальних мереж показує, що їх безпосереднє застосування в тактичних системах військового зв'язку неможливе. У сучасних тактичних радіомережах необхідно використовувати комерційні стандарти та сучасне мережеве обладнання підвищеної надійності з урахуванням вимог експлуатації в жорстких польових умовах. До особливостей сучасних тактичних мереж зв'язку можна віднести:

- динамічну топологію (вузли мережі мобільні, підлягають зникненню та відмовам; канали радіозв'язку нестабільні, мають обмежену дальність зв'язку і

пропускну здатність через вплив радіоелектронної протидії супротивника, взаємних завад, умов поширення радіохвиль тощо);

- обмежені потужність і час передавання для абонентів, які оснащені радіотерміналами з акумуляторними батареями;
- велику розмірність мереж (сотні або тисячі елементів);
- неоднорідність елементів мережі: за мобільністю (танк, солдат, вертоліт, літак), за рівнем продуктивності (мобільна базова станція, мобільний абонент) [8].

Основними технічними вимогами для наступного покоління систем зв'язку (як військового, так і промислового, мобільного) є:

- інтеграція всіх видів трафіку (мовлення, дані, відео, відеоконференція);
- повна мобільність всіх абонентів і елементів мережі;
- забезпечення заданої якості обслуговування користувачів (QoS) на великих географічних територіях в умовах застосування як звичайної, так і ядерної, біологічної та хімічної зброї;
- гарантована безпека усіх видів інформації;
- мінімальна участь людини у вирішенні питань планування і ведення зв'язку.

Однак, попри тривалий час розроблення самоналагоджувальних радіомереж і сьогодні залишаються невирішеними багато проблемних питань, що перешкоджають поширенню таких мереж як у військовій сфері, так і у загальній структурі глобальних телекомунікацій.

Проведений аналіз можливих варіантів побудови архітектури мереж тактичної ланки продемонстрував переваги застосування мобільних радіомереж (Mobile ad-hoc networks, MANET) порівняно зі стільниковими чи транкінговими мережами та MANET (табл. 1.3) [8].

Таблиця 1.3

Порівняльна характеристика застосування тактичних радіомереж

<i>Характеристика</i>	<i>Стільникові мережі</i>	<i>Транкінгові мережі</i>	<i>Супутникові мережі</i>	<i>Мобільні радіомережі</i>
<i>Архітектура</i>	Фіксовані зони обслуговування, стаціонарні базові станції		Зони обслуговування, стаціонарні базові станції	Відсутність фіксованої інфраструктури, кожен вузол являє собою ретранслятор (маршрутизатор) повідомлень
	Стаціонарної мережі загального користування	Фіксована мережа для з'єднання базових станцій	Фіксованої мережі для з'єднання базових станцій та мобільні компоненти	
<i>Тип топології</i>	Статична (базові станції статичні)		Статична (базові станції статичні)	Випадкова, високо-динамічна, адаптація топології до умов функціонування
<i>Тип керування</i>	Централізований, наявність окремої (виділеної) мережі керування		Централізований, наявність окремої мережі керування	Децентралізований, не має виділеної мережі керування
<i>Мобільність</i>	Мобільні, тільки абоненти в межах зон покриття стаціонарними базовими станціями		Мобільні абоненти в межах зон покриття стаціонарними базовими станціями	Мобільні всі елементи мережі
<i>Завадозахищеність</i>	Дуже низька, у мереж стандарту CDMA висока	Дуже низька	Дуже низька, складні завадостійкі коди, велика антена	Дуже висока (технології OFDM, MIMO, завадостійкого кодування)
<i>Розвідзахищеність</i>	Низька (CDMA висока)	Низька	Низька	Висока
<i>Самонаслаштування від завад</i>	Низька (від атмосферних)	Дуже низька (від атмосферних)	Низька	Висока (технології ISK в у з л о м , O F D M , MIMO, завадостійкого кодування)
<i>Сфера застосування</i>	Тилові підрозділи, антитерористичні операції		Мережа на базі VSAT військовоцівільна	Поле бою, надзвичайні ситуації

Серед них можна видокремити такі проблеми:

1. Організація надійного транспорту даних за змінної структури і топології мережі.
2. Підвищення швидкості передавання інформації, яка зазвичай обмежена виділеним частотним ресурсом та методами доступу абонентів до колективно

використовуваного радіоресурсу.

3. Створення ефективних методів (алгоритмів) керування на різних рівнях еталонної моделі взаємодії відкритих систем з урахуванням особливостей конкретної радіомережі із самоорганізацією. Поява нових технологій радіозв'язку (MIMO, систем визначення місцеположення, ширококутових та надширококутових сигналів тощо), а також різні прикладні програми, потребують створення нових методів керування даними мережами, у тому числі з використанням методів штучного інтелекту.

4. Проблема ефективного використання ресурсів вузлів (більшість вузлів мережі можуть бути портативними і відповідно обмежені у ресурсах: із продуктивністю процесорів, ємністю пам'яті та енергоемністю батареї та ін.)

5. Гарантування заданої якості обслуговування для різних типів трафіку, пов'язаного із забезпеченням необхідних затримок і швидкостей передавання, кількості втрачених пакетів, тривалості часу відновлення зв'язності після її втрати.

6. Проблема масштабованості та адресації в мережах зі організацією мобільних радіомереж великої розмірності.

7. Взаємодія з мережами загального користування та мережею Інтернет.

8. Забезпечення безпеки в умовах децентралізованого керування та широкоповної природи радіоканалу.

У більшості наукових праць учених приділено увагу вирішенню багатьох зазначених проблем. Таким чином, система зв'язку тактичної ланки керування розвивається в напрямку застосування відкритої архітектури, упровадження новітніх телекомунікаційних технологій в розроблення мобільних радіомереж із самоорганізацією. Упровадження таких мереж дозволить створити транспортне середовище для єдиного інформаційного простору поля бою і забезпечити ефективну реалізацію бойових можливостей військ [5].

Можна конкретизувати труднощі, з якими стикаються розробники і ті, хто експлуатує сучасні радіомережі. Порівнянно з існуючими мережами

завадостійкість радіомереж із самоорганізацією зростає на 12–20 %, надійність та своєчасність отримання інформації збільшуються через підвищення пропускної здатності ретрансляції. Однією з проблем одночастотних дуплексних ретрансляторів радіомереж є розширення смуги пропускання. Збільшення смуги пропускання можливе внаслідок застосування мостових схем з надширокою смугою балансу – максимальне значення розв'язки в таких схемах може досягати 50–60 дБ, або  $10^5$ – $10^6$  разів за потужністю [1].

У праці [9] вивчається ще один підхід до оптимізації пропускної здатності у випадку, коли ретранслятор радіомережі має велику кількість антен (технологія MIMO). На пропускну здатність MAC-рівня радіомережі впливають приховані абоненти, що підвищують вразливість прийняття рішення за конкурентного доступу до радіоканалу. Застосування протоколу управління доступом до радіоканалу, заснованого на процедурах множинного доступу з контролем сигналу опорної частоти (МДКН), дозволяє підвищити пропускну здатність радіомережі у 2,37 разу [1, 10].

Для підвищення завадозахищеності радіолінії необхідно збільшувати ширину хопсета та зменшувати відстань між радіостанціями кореспондентів. Останнє може бути реалізовано шляхом використання режимів з підтриманням MANET [11]. Більшу завадозахищеність сучасних вузькосмугових радіостанцій будуть забезпечувати режими роботи з підтриманням режиму MANET (NBNR, WBNR у радіостанціях Aselsan, ANW2C у радіостанціях Harris), оскільки для них придушення наземного або повітряного ретранслятора не призводить до повної втрати зв'язку в мережі – маршрут передавання може проходити через одну або декілька наземних станцій. При цьому зменшуються відстані між радіостанціями на окремих наземних радіолініях, а отже збільшується відношення сигнал/(шум + завада) у точці приймання [11].

Зменшити енергетичний виграш як наземного, так і повітряного постановника завад також можна шляхом раціонального вибору траєкторії баражування БПЛА-ретранслятора, а також шляхом застосування адаптивних



антенних решіток. Напрямами подальших досліджень є розроблення методики адаптивного діаграмоутворення у радіомережах класу MANET з використанням телекомунікаційних аероплатформ [11, 12–15].

Системам зв'язку з OFDM-модуляцією властивості ортогональності перешкоджають взаємному впливу несучих, які перекриваються. Однак порушення форми сигналу, спричиняються IQ-спотвореннями, фазовим шумом, лінійною (AM-AM) і нелінійною (AM-ФМ) компресією; частотні зрушення також можуть стати причиною спотворень модульованого сигналу [16].

Фактором, який найчастіше викликає проблеми в системах зв'язку з OFDM-модуляцією міліметрового діапазону, є фазовий шум. Дуже високий рівень фазових шумів у пристрої здатен призвести до того, що близько розташовані ортогональні піднесучі будуть відчувати взаємний вплив, який погіршує якість демодульованого сигналу [12, 16].

У разі переходу в міліметровий діапазон, проектування пристроїв на модульованих частотах та на високих частотах може ускладнитися проблемами, які зумовленні порушеннями форми сигналу та які з перенесенням спектра на найвищі частоти або з розширенням смуги стають дедалі більш значними [12, 16].

## **1.2. Аналіз типових структур мобільних радіомереж**

Транкінгові системи радіозв'язку. У транкінгових системах радіозв'язку дані передаються по довільній лінії, абонент вибирає конкретний канал зв'язку. Після завершення розмови канал зв'язку стає вільним і ним можуть користуватися інші абоненти. У цьому суть транкінгової системи зв'язку. Транкінгові радіосистеми мають «інтелект», що дозволяє їм самим вирішувати, який саме канал звільнити для поточного радіообміну. Користувачеві не потрібно думати про те, вільна лінія чи ні. Використання таких систем у радіозв'язку дає багато переваг своїм абонентам. Транкінгові мережі рухомого

радіозв'язку належать до радіальних і зонново-радіальних систем зв'язку, які в автоматичному режимі здатні розподіляти вільні канали між абонентами. Є кілька впроваджених стандартів транкінгових радіосистем, які відрізняються методами відправлення / приймання голосових повідомлень, типом загального режиму каналу керування, а також іншими робочими параметрами.

Стандарти цифрового транкінгового радіозв'язку: EDACS, розроблений фірмою Ericsson; TETRA, розроблений Європейським інститутом стандартів зв'язку; APCO 25, розроблений Асоціацією офіційних представників служб Motorola (США) та Tetrapol, розроблений фірмою Matra Communication (Франція).

Структурна мережі транкінгового радіозв'язку, наприклад стандарту TETRA, складається з інфраструктури комутації і керування (SwMI) як функціонально закритого елемента, і восьми інтерфейсів, які є відкритими і стандартизованими (рис. 1.3).



Рис. 1.3 Структурна схема мережі транкінгового радіозв'язку стандарту TETRA[17].

Це такі інтерфейси: системний радіоінтерфейс (TMO AI); радіоінтерфейс прямого режиму роботи (DMO AI); інтерфейс з іншими системами (ISI); шлюз у зовнішні мережі (PSTN, ISDN); інтерфейс з периферійним обладнанням (PEI);

інтерфейс з віддаленим диспетчером (LSI); інтерфейс керування мережею (NMI) та інтерфейс користувача (MMI) [17–19].

Стільниковий зв'язок – один з видів мобільного радіозв'язку, в основі якого лежить стільникова мережа. Особливість стільникового зв'язку полягає в тому, що зона покриття поділяється на «стільники», що визначаються зонами покриття окремих базових станцій. Стільники частково перекриваються й разом утворюють мережу. На ідеальній (рівній і без забудови) поверхні зона покриття однієї базової станції являє собою коло, тому складена з них мережа має вигляд шестикутних зон (бджолиних стільників). Цифрові системи стільникового рухомого зв'язку являють собою системи другого покоління. У порівнянні з аналоговими системами вони надають абонентам більший набір послуг і забезпечують підвищену якість зв'язку, а також взаємодію з цифровими мережами з інтеграцією служб (ISDN) і пакетного передавання даних (PDN). Розглянемо структуру стільникового рухомого цифрового зв'язку на прикладі стандарту GSM-900. Відповідно до рекомендацій СЕРТ стандарт GSM-900 передбачає роботу передавачів для базових станцій у діапазоні 935-960 МГц, для рухомих станцій - 890-915 МГц.

Серед цих систем найбільшого поширення набули ті, які базуються на стандартах GSM (DCS1800), D-AMPS (ADC), JDC, DECT, CDMA (табл. 1.4) [20].

Таблиця 1.4

## Порівняльні характеристики цифрових стандартів [20]

Характеристики стандарту	GSM (DCS1800)	D-AMPS	JDC	CDMA
Метод доступу	TDMA	TDMA	TDMA	CDMA
Кількість мовних каналів на несучу	8(16)	3	3	32
Робочий діапазон частот, МГц	935–960	824–840	810–826	824–840

	890–915 (1710–1785) (1805–1880)	869–894	940–956 1429–1441 1447–1489 1501–1513	869–894
Рознесення каналів, кГц	200	30	25	1250
Еквівалентна смуга частот на один розмовний канал, кГц	25 (12,5)	10	8,3	–
Вид модуляції	0,3 GMSK	n/4 DQPSK	n/4 DQPSK	QPSK
Швидкість передвання інформації, Кбіт/с	270	48	42	–
Швидкість перетворення мови, кбіт/с	13 (6,5)	8	11,2 (5,6)	–
Алгоритм перетворення мови	RPE - LTR	VSELP	VSELP	–
Розмір стільника, км	0,5–35,0	0,5–20,0	0,5–20,0	0,5–25,0

Типову схему стільникової мережі рухомого зв'язку цього стандарту зображено на рис. 1.4, на якій:

- MSC (Mobile Switching Center) - центр комутації стільникової мережі;
- BTS (Base Transceiver Center) - базові станції;
- BSC (Base Station Controller) - контролери базових станцій;
- OMC (Operation and Maintenance Center) - центр керування та експлуатації;
- VMS (Voice Messaging Center) - служби обміну мовними повідомленнями та коротких повідомлень SMS.

Функції MSC та OMC здійснюють цифрові системи комутації 5ESS і EWSD за умови їх апаратного та програмного дообладнання. Зокрема, кожен MSC повинен мати реєстр візитних абонентів VLR ( Visitor Location Register), а також власний чи спільний для кількох MSC центр автентифікації рухомих

абонентів AUC (Authentication Center) і реєстр власних абонентів HLR (Home Location Register) та ідентифікації обладнання рухомих станцій EIR (Equipment Identity Register).

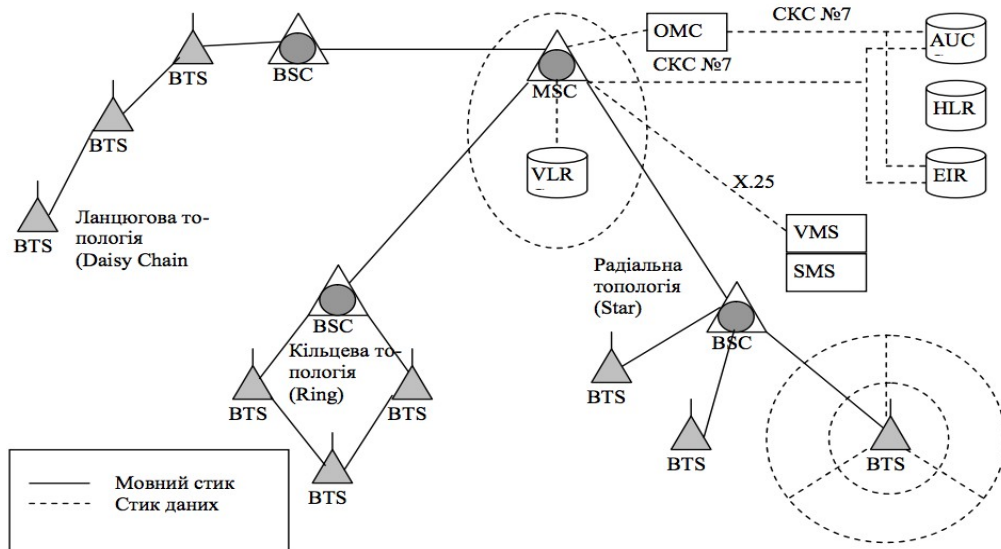


Рис.1.4 Структура стільникової мережі рухомого зв'язку стандарту

GSM-900 [21]

Указані реєстри і центр автентифікації являють собою спеціалізовані комп'ютерні бази даних. У рамках стандарту GSM упроваджені п'ять класів рухомих станцій: від моделі 1-го класу з вихідною потужністю до 20 Вт, що встановлюється на транспортних засобах, до моделі 5-го класу з максимальною вихідною потужністю до 0,8 Вт.

Під час передавання повідомлень передбачається адаптивне регулювання потужності передавача, що забезпечує необхідну якість зв'язку. Рухома і базова станції незалежні одна від одної. Кожна рухома станція має свій міжнародний ідентифікаційний номер IMSI (International Mobile Subscriber Identity), записаний у її пам'яті [20–21].

На особливу увагу заслуговує система стільникового зв'язку CDMA (Code Division Multiple Access). Основні напрями впровадження і використання CDMA – це наземні фіксовані бездротові телефонні мережі (стандарт cdmaOne

WLL), стільникові мобільні системи зв'язку і супутникові системи зв'язку. На відміну від інших цифрових систем, що підлягають відведенню діапазону на вузькі канали за частотною (FDMA) або часовою (TDMA) ознакою, у стандарті CDMA передану інформацію кодують і код перетворюють у шумоподібний широкопasmовий сигнал так, що його можна виділити знову, тільки маючи код на боці приймання.

Одночасно в широкій смузі частот можна передавати і приймати множину сигналів, що не заважають один одному. Множинний доступ з кодовим розділенням CDMA є досить складним не тільки за принципом побудови, але й щодо практичної реалізації. Відповідно цього методу більша група користувачів одночасно використовує загальну відносно широку смугу частот – не менше 1 МГц. Особливістю методу CDMA є робота в широкій смузі частот, яка значно перевищує смугу мовного сигналу. При цьому для розрізнення каналів однієї базової станції інформація кожного каналу модулюється спеціальною кодовою послідовністю, що формується за допомогою функції Уолша. Функції Уолша широко використовуються в цифровому обробленні сигналів і є дискретним аналогом синусоїдальних частот. Склад устаткування мереж стандарту CDMA багато в чому подібний до складу устаткування мереж стандарту GSM і містить у собі рухомі та базові станції, цифрові комутатори, центр керування й обслуговування, різні додаткові системи та пристрої. Функціональне спряження елементів системи здійснюється за допомогою ряду інтерфейсів.

У стандарті CDMA застосовується метод багатостанційного доступу з кодовим розділенням каналів, оснований на використанні широкопasmових сигналів. Кожному виклику присвоюється унікальний код, що дозволяє відрізнити цей виклик від інших, переданих у тому ж частотному діапазоні. У цьому стандарті забезпечується вища якість мови, ніж у стандарті GSM, не кажучи вже про аналогові стандарти.

Недоліками систем з кодовим розподілом каналів стандарту CDMA є :

– самозаглушення – за відсутності синхронізації адреси каналів будуть неортогональними, що призведе до збільшення взаємної кореляції, і, як наслідок, до збільшення взаємних завад і зменшення пропускну здатності системи. На відміну від систем CDMA у системах FDMA і TDMA існують частотні або часові захисні проміжки;

– проблема достатньо точного регулювання потужності (вирівнювання потужності сигналів на вході приймача, одного від одного, які віддалені на значні відстані);

– м'яке естафетне передавання керування рухомим об'єктом, який спочатку входить у новий осередок, а потім залишає старий. Процес складніший ніж аналогічний в системах з FDMA і TDMA [21–22]. Сукупність таких властивостей, як завадостійкість, завадозахищеність і прихованість пояснює високу зацікавленість у застосуванні технології CDMA для потреб силових структур.

Супутниковий зв'язок – один з видів космічного радіозв'язку, що базується на використанні штучних супутників Землі, на яких змонтовані ретранслятори. Супутниковий зв'язок здійснюється між земними станціями, які можуть бути як стаціонарними, так і мобільними. До складу системи персонального супутникового зв'язку, структуру якої наведена на рис. 1.5, незалежно від їх призначення входять такі компоненти:

1. Космічна станція (КС), що являє собою супутниковий ретранслятор для приймання та передавання радіосигналів, а також ряд систем забезпечення (СР), що містять в собі приймально-передавальний пристрій, антени енергопостачання, системи орієнтації антен і сонячних батарей, системи корегування положення КС на орбіті і ін..

2. Абонентські пристрої або наземна станція (НС), що забезпечують дуплексний обмін інформацією.

3. Центральна (координувальна) наземна станція (ЦНС), що забезпечує контроль за режимом роботи СР і дотриманням НС важливих для роботи

супутникової системи зв'язку параметрів (потужності випромінювання, опорної частоти, виду поляризації, характеристик модульованого сигналу і ін.).

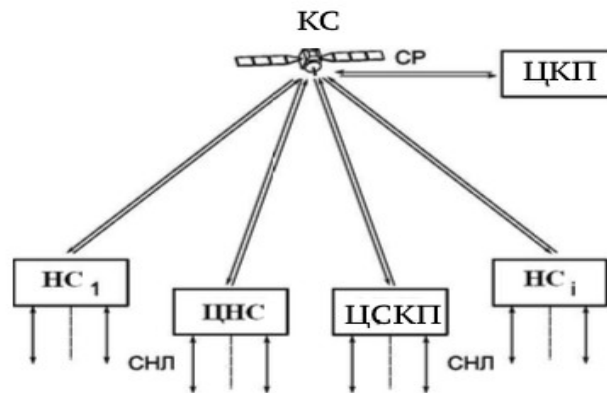


Рис. 1.5 Структура системи персонального супутникового зв'язку [20]

4. Центральна наземна станція системи керування й контролю космічним апаратом (ЦСКП), що забезпечує керування всіма технічними засобами, розміщеними на космічному апараті, і контроль за їх станом.

5. Сполучні наземні лінії (СНЛ), що забезпечують підключення наземної станції до джерел і споживачів переданої інформації.

6. Центр керування (ЦКП) супутникової системи зв'язку – орган, який здійснює керує експлуатацією супутникової системи зв'язку та її розвитком.

Супутниковий зв'язок посідає особливе місце в системі військового зв'язку. Його основною перевагою є висока оперативність установа з'єднання на великі відстані (у межах усієї земної кулі за умови використання систем з глобальним покриттям). В основу технічної реалізації побудови системи супутникового зв'язку збройних сил України доцільно покласти технологію VSAT (Very Small Aperture Terminal – мала супутникова наземна станція) [20,24]. Мережа супутникового зв'язку на базі VSAT містить три основні елементи: центральну земну станцію, супутник-ретранслятор і абонентські VSAT термінали [24,25]. Типова схема організації системи



супутникового зв'язку VSAT представлена на рис. 1.6.

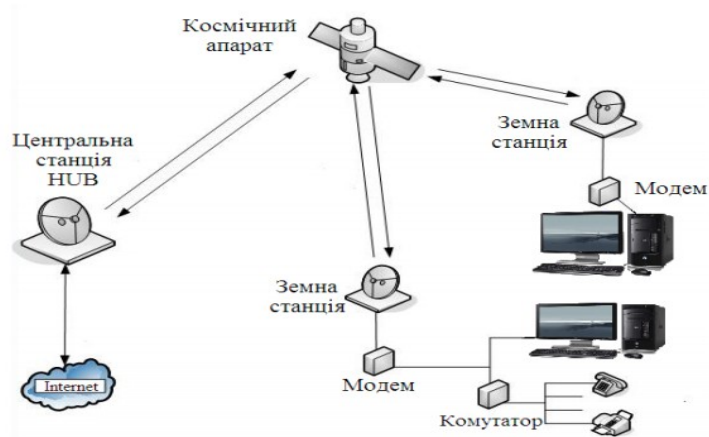


Рис. 1.6. Типова схема організації системи супутникового зв'язку VSAT [24]

Керування системою супутникового зв'язку повинно здійснюватись з єдиного центру управління – центру оперативно-технічного керування системою супутникового зв'язку. Для забезпечення захисту інформації в системі супутникового зв'язку повинна бути створена комплексна система захисту інформації [24–25].

Недоліками застосування системи супутникового зв'язку є:

- Слабка завадозахищеність - величезні відстані між земними станціями й супутником є причиною того, що відношення сигнал / шум на приймачі дуже мале (набагато менше, ніж для більшості радіорелейних ліній зв'язку). Для того, щоб у цих умовах забезпечити прийнятну вірогідність помилки, доводиться використовувати великі антени, малощумні елементи и складні завадостійкі коди. Особливо гострою ця проблема є для систем рухомого зв'язку, бо в них існує обмеження на розмір антени і, як правило, на потужність передавача.
- Проблема затримки поширення сигналу так чи інакше зачіпає всі супутникові системи зв'язку. Найбільшу затримку мають системи, що використовують супутниковий ретранслятор на геостаціонарній орбіті. У

цьому випадку затримка, зумовлена кінцевою швидкістю поширення радіохвиль, складає приблизно 250 мс, а з урахуванням мультиплексування, комутації і затримок оброблення сигналу загальна затримка може становити до 400 мс [19]. У деяких системах (наприклад, у системах VSAT, що використовують топологію «зірка») сигнал двічі передається через супутниковий канал зв'язку (від терміналу до центрального вузла і від центрального вузла до іншого терміналу). У цьому випадку загальна затримка подвоюється.

- Вплив атмосфери – на якість супутникового зв'язку сильно впливають ефекти у тропосфері та іоносфері [26]. Поглинання сигналу атмосферою залежить від його частоти. Поглинання має яскраво виражений частотно-залежний характер; спостерігаються резонансні піки на частотах 22 і 165 ГГц (для водяної пари), а також 60 і 120 ГГц (для кисню) [27]. У цілому поглинання істотно позначається на поширенні сигналів з частотою понад 10 ГГц (тобто, починаючи з Ku-діапазону). Крім поглинання, під час поширення радіохвиль в атмосфері присутній ефект завмирання, причиною якого є різниця значень коефіцієнтів заломлення різних шарів атмосфери.
- Іоносферні ефекти – це ефекти в іоносфері зумовлені флуктуаціями розподілу вільних електронів. Іоносферними ефектами, що впливають на поширення радіохвиль, є мерехтіння, поглинання, затримання поширення, дисперсія, зміна частоти, обертання площини поляризації [27–29]. Усі ці ефекти послаблюються зі збільшенням частоти для сигналів з частотами, понад 10 ГГц їх вплив невеликий. Сигнали з відносно низькою частотою (L-діапазон і частково С-діапазон) потерпають від іоносферного мерехтіння, що виникає чере з неоднорідності в іоносфері. Результатом цього мерехтіння є постійна зміна потужності сигналу [27].
- Вплив сонячної інтерференції – зі наближенням Сонця до осі «супутник-наземна станція» радіосигнал, що приймається із супутника наземною

станцією, спотворюється в результаті інтерференції.

Високими темпами в останні роки розвивається напрям розвитку радіомереж, який називають концепцією інтернет речей. З кожним роком дедалі більше пристроїв підключаються до Інтернету. Більшість пристроїв має автономне батарейне живлення. Тому однією з важливих характеристик інтернету речей є тривала робота пристрою без додаткового обслуговування і підзарядження батарей системи електроживлення. Ефективне вирішують завдань, пов'язані з енергоспоживанням пристроїв, які підключаються до мережі, нові типи радіомереж LPWAN (Low Power Wide Area Networks). Найбільш популярними серед таких технологій є LoRa, SIGFOX, NB-IoT, Weightless P та ін. Поява радіомереж нового покоління зумовлено необхідністю підключення численних приладів обліку і телеметрії для централізованого збирання даних на хмарних серверах.

Розробники технології LoRa (фірма Alliance) вважають, що технологія LoRa має значні переваги перед WiFi і стільниковими мережами завдяки можливості розгортання міжмашинних з'єднань (Machine-to-Machine, M2M) на відстань до 20 км за швидкості до 50 кбіт/с, а також має мінімальне споживання електроенергії, що забезпечує кілька років автономної роботи на одному акумуляторі типу AA. Ця технологія набула широкого застосування: від автоматизації будинку та інтернету речей до промисловості та розумних міст [29–31]. У LoRaWAN мережах стандарту передбачено обов'язкове дворівневе шифрування даних двома різними AES-64 і 128 ключами для захисту від несанкціонованого доступу і спотворення, або перехоплення даних, передаваних кінцевими пристроями.

SIGFOX є приватною компанією, діяльність якої спрямована на створення всесвітньої мережі, спеціально розробленої для пристроїв IoT (Internet of Things). Технологія дозволяє передавати дані на великі відстані за малої потужності передавального пристрою і малої ємності батареї. Мережа відмінно підходить для простих і автономних пристроїв, які посилають

невелику кількість даних у цю мережу. Так, мережа SIGFOX схожа на стільникову інфраструктуру (GSM і GPRS-3G-4G), але більш енергоефективна і водночас менш витратна. SIGFOX використовує ультравузьку смугу частот UNB (Ultra Narrow Band) на основі радіотехнології для підключення пристроїв до глобальної мережі. Використання UNB – ключовий фактор у забезпеченні дуже низького рівня потужності передавача, який буде використовуватися для підтримання з'єднання надійних даних. Мережа працює в неліцензованих діапазонах ISM (The industrial, scientific and medical) у глобальному масштабі і співіснує в цих частотах з іншими радіотехнологіями без проблеми перекриття мережі або проблеми пропускної здатності. У Європі широко використовується діапазон 868,8 МГц (як визначено в ETSI і CEPT), а у США 915 МГц (як визначено FCC). Зона охоплення мережі SIGFOX становить близько 30–50 км в сільській місцевості та в міських районах. У місцях з високим рівнем завад і зашумлення ефіру діапазон знижується в межах 3–10 км. SIGFOX мережі планується впроваджувати в 60 країнах. У Сполучених Штатах, це Сан-Франциско, «кремнієва долина» та інші ключові місця, де реалізуються пілотні проекти, які будуть наступним великим ринком мережевих технологій SIGFOX [30].

Технологія NB-IoT (NarrowBand IoT – вузькосмуговий інтернет речей), він же стандарт LTE-Cat.M2, має ряд переваг, таких як широка зона охоплення, швидка модернізація діючої мережі, низьке енергоспоживання, яке гарантуватиме 10-річний термін служби батареї джерела енергоживлення, низька вартість терміналу, plug and play, підвищена надійність і велика мережа операторського класу безпеки. Технологія NB-IoT дає змогу сучасним операторам радіомереж працювати з традиційними напрямками IoT, такими як інтелектуальні системи обліку, відстеження, а також відкриває більше можливостей для промисловості, напряму «розумне місто», системи електронної охорони здоров'я. Розгортання технології NB-IoT у смугах частот 700, 800 і 900 МГц є відмінним вибором, оскільки це досить велика екосистема

насамперед через його підтримання з боку багатьох найбільших світових операторів мобільних радіомереж.

Лідером розроблення стандарту Weightless стала компанія Ubiik. Weightless, яка являє собою відкритий стандарт для мереж LPWAN підвищеної потужності, призначеної для продуктивності мережі. У спеціальній групі інтересів Weightless SIG (Special Interest Group) пропонується три різні протоколи – Weightless-H, Weightless-W і Weightless-P, які підтримують різні форми і варіанти використання. Weightless-W – це відкритий стандарт, призначений для роботи на частотах телевізійного діапазону TVWS (TV white space). Weightless-W ідеально підходить для використання в нафтовій і газовій галузях. Порівняння технологій мереж дальнього радіуса дії наведено в табл. 1.5. [30].

Таблиця 1.5

## Порівняння технологій мереж дальнього радіуса дії LPWAN

Технічні характеристики	LoRa	SIGFOX	NB-IoT	Weightless P
1	2	3	4	5
Метод модуляції	CSS	–	OFDMA/DSSS	FDMA / TDMA
Діапазон	ISM	ISM	Ліцензований	ISM
Швидкість	0,3–50 кбіт / се	100 біт / с	UL:1–144 кбіт/с DL:1–200 кбіт /с	0,2–100 кбіт / с (адаптивна)
Смуга	Шірокосмугова. до 500 кГц	Вузькосмугова 100 кГц	Вузькосмугова 200 кГц	вузькосмугова 12,5 кГц
Час автономної роботи	Понад 10 років	–	До 10 років	3–5 років
Смуга робочих частот	868,8 МГц (Європа) 915 МГц (США) 433 МГц (Азія)	868,8 МГц (Європа) 915 МГц (США)	700/800/900 МГц –	169 / 433 / 470 / 780 / 868 / 915 / 923 МГц
Безпека	AES–64 і 128 біт	AES з HMACs	–	AES–128 / 256
Дальність	До 2,5 км у місті, до 45 км поза містом	До 10 км у місті, до 50 км поза містом	–	До 2 км в місті

Підтримка	LoRa Alliance, IBM, Cisco, Actility, Semtech	SigFox, Samsung	3GPP, Ericson, Nokia, Huawei, Intel	Ubiik Weightless SIG
-----------	--	-----------------	---	-------------------------

### 1.3. Формулювання завдань на дослідження

Нині ведуться дослідження зі створення інтелектуальних радіозасобів і радіомереж у цілому, які можуть адаптувати режими й алгоритми роботи на основі рішень, що приймаються системами керування в яких використовуються бази даних і бази знань. Більшість розвинених країн світу розглядають застосування військових радіомереж із самоорганізацією як перспективу розвитку систем зв'язку тактичного й оперативного-тактичного рівнів. Мобільна компонента (сукупність мереж MANET, що мають здатність до самоорганізації, переміщення, згорання і розгорання вузлів) покликана забезпечити інформаційний обмін в інтересах військ, які є в тактичній зоні незалежно від їх підпорядкування та поставлених завдань, які вони виконують. Передбачається, що її архітектура неоднорідна, ієрархічна і складатиметься з наступних основних рівнів (рис. 1.7) [1,5,12,13, 32, 33]:

- 0–й рівень. Утворюються бездротові сенсорні мережі.
- 1–й рівень. Солдат оснащений радіостанцією-модемом на частоті 2,4 ГГц, зі структурою сигналу за технологією OFDM із системою позиціонування типу GPS, що забезпечує автоматичну прив'язку до геоінформаційної підсистеми.
- 2–й рівень. Командир групи (груп), оснащений комунікатором із щонайменше двохканальним комунікатором (2,4–2,498 та 5,6–5,8 ГГц), для зв'язку для забезпечення зв'язку з вищим рівнем та входом в опорну мережу зі структурою сигналу за технологією OFDM.
- 3–й рівень. Містить рухомі об'єкти (бронетранспортери, танки, автомобілі, пересувні польові командні пункти та ін.), які оснащені

компактними комунікаторами-ретрансляторами мультиранговою системою комунікації на частотах 5,6–18 ГГц.

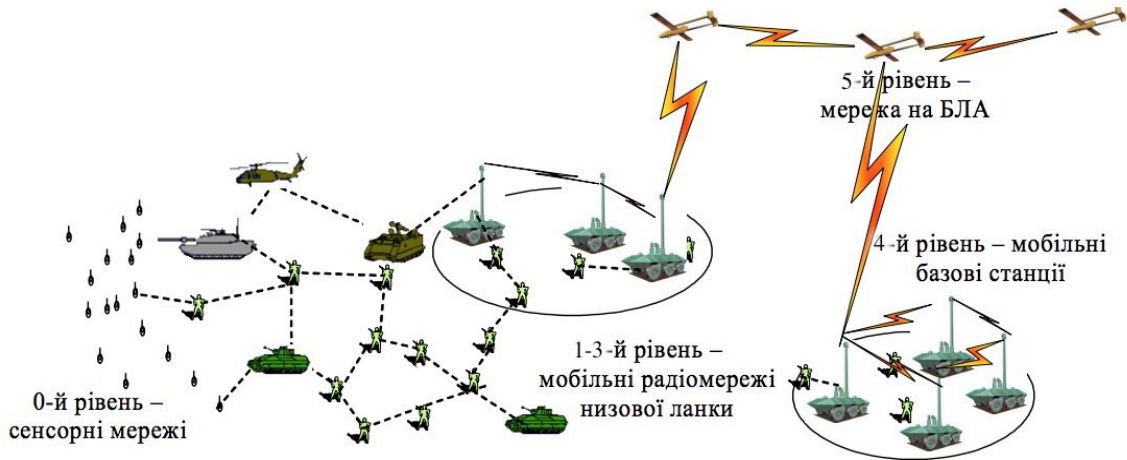


Рис. 1.7. Архітектура перспективної мобільної радіомережі [5]

- 4-й рівень. Містить стаціонарні і мобільні базові станції-ретранслятори, оснащені більш потужними передавачами з мультиранговою системою комунікації на частотах 5,6–18 ГГц. Цей рівень складається з мережевого обладнання, устаткування зберігання даних і архіву мережі, бази знань, часткового зберігання баз геоінформаційної системи, вузла керування опорною мережею – керувальна система з архівом, доступом і контролем стану мережі, серверної геоінформаційної системи (типу ArcGIS Enterprise).
- 5-й рівень. Це ретранслятори (4-го рівня), які змонтовані на БПЛА. БПЛА-ретранслятор є сполучним елементом різних віддалених радіомереж або груп радіомереж тактичного рівня [12,13].

Ця масштабована архітектура являє собою сукупність мобільного, мережевого інформаційного обладнання та високорівневі сервіси, необхідні для розширення глобальної інформаційної координатної мережі (GIG) безпосередньо в руки солдатів у бойовому просторі. Мережеві процеси, які дозволяють проводити магістральні сервіси, варіюються від операцій типу

лептоп-лептоп, наприклад безпечна електронна пошта, служби внутрішньої мережі і тактичного інтернету на базі протоколу Web 2.0, і до комплексних C4ISR-операцій (командування, керування, зв'язок, комп'ютери, збирання інформації, спостереження і рекогносцировка), наприклад тих, які узгоджуються з керуванням БПЛА, вогнем артилерії та ракетними комплексами. Радіомережі MANET – це масштабовані, що адаптуються, широкопasmові мережі, що відповідають загальним оперативним стандартними протоколами, які забезпечують тактичну широкопasmову магістраль для надійних, розподілених C2 (оперативне керування), C4 (командування, керування, зв'язок та обчислювальна техніка), C4I і C4ISR операцій всіх типів. Бездротові ніздрюваті мережі, наприклад, такі що складаються з передавальних вузлів, організованих у порожнисту топологію, яка не складається із фіксованих або статичних терміналів. Зона покриття радіовузлом, які працює як єдина мережа, доступ до якої залежить від радіовузлів, які працюють синхронно один з одним з метою створення динамічної радіомережі. Надмірність і надійність є ключовими елементами таких мереж. Такі динамічні, самоналаштувальні радіомережі мають здатність самовідновлюватися в умовах завад або нестабільності.

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

- обґрунтувати доцільність застосування самоналагоджувальних радіомереж;
- проаналізувати типові структури радіомереж;
- удосконалити модель функціонування мобільної радіомережі, поданої у вигляді умовного графу, що включає елементи навчання поведінки мережі в умовах завад;
- увести нові процеси інтелектуальної системи керування вузлом мобільної радіомережі;
- знайти нові методи самонастроювання радіомережі для пошуку



найкоротшого маршруту в мережі, що зазнає впливу завад.

- виконати моделювання зміни топології радіомережі в розрізі завадостійкості мережевої структури;
- дослідити й оцінити стійкість мережевої структури в динамічній зміні та оцінити межі стійкої зв'язності вузлів радіомереж.

### **Висновки за розділом 1**

1. У самоорганізувальних радіомережах зростає завадостійкість на 12–20%, надійність та своєчасність отримання інформації збільшується шляхом підвищення пропускної здатності ретрансляції. Збільшення смуги пропускання можливе внаслідок застосування мостових схем з найширшою смугою балансу – максимальне значення розв'язки в таких схемах може досягати 50–60 дБ, або у  $10^5$ – $10^6$  разів за потужністю. Пропускню здатність можна підвищити, якщо ретранслятор радіомережі має велику кількість антен (технологія MIMO). Зменшити енергетичний виграш як наземного, так і повітряного ретранслятора можна шляхом застосування адаптивних антенних решіток.

2. Існуючі радіомережі виділяються більшою пропускною здатністю, завадозахищеністю, прихованістю завдяки використанню функцій інтелектуальної системи керування вузлами мобільної радіомережі: обсяг службового трафіку з використанням інтелектуального методу маршрутизації скорочується на 20–30%; застосування адаптивних протоколів дозволяє зі збільшенням розміру пакета передавання підвищити пропускню здатність до 50%; застосування протоколу керування доступом до радіоканалу, заснованого на процедурах множинного доступу з контролем опорного сигналу, дає змогу підвищити пропускню здатність радіомережі у 2,37 разу.

3. Для підвищення завадозахищеності радіолінії необхідно збільшувати ширину хопсета та зменшувати відстань між вузькосмуговими радіостанціями кореспондентів, що може бути реалізовано шляхом використання режимів з

підтриманням MANET

4. Притаманні системам зв'язку з OFDM-модуляцією властивості ортогональності перешкоджають взаємному впливу опорних сигналів, що перекриваються. Порушення форми сигналу радіомережі з OFDM-модуляцією, спричиняються IQ-спотвореннями, фазовим шумом, лінійною (AM-AM) і нелінійною (AM-ФМ) компресією. Проблеми в системах зв'язку з OFDM-модуляцією міліметрового діапазону часто зумовлюються фазовим шумом.

5 Системи супутникового зв'язку нарівні з перевагами мають такі недоліки, як слабку завадозахищеність – величезні відстані між земними станціями і супутником спричиняються дуже малим відношенням сигнал / шум на приймачі, особливо це стосується систем рухомого зв'язку; проблема затримки поширення сигналу – найбільшу затримку мають системи, що використовують супутниковий ретранслятор на геостаціонарній орбіті (затримка складає близько 250 мс, а з урахуванням мультиплексування, комутації та затримок оброблення сигналу загальна затримка може становити до 400 мс); на якість супутникового зв'язку відчутно впливають ефекти в тропосфері та іоносфері – поглинання має яскраво виражений частотно-залежний характер; спостерігаються резонансні піки на частотах 22 і 165 ГГц (для водяної пари) та 60 і 120 ГГц (для кисню); ефекти в іоносфері зумовлюються флуктуаціями розподілу вільних електронів (мерехтінням, поглинанням, затримкою поширення, дисперсією, зміною частоти, обертанням площини поляризації); сигнали з відносно низькою частотою (L-діапазон і частково С-діапазон) потерпають від іоносферного мерехтіння, що виникає через неоднорідності в іоносфері.

6. Завдання, пов'язані з енергоспоживанням пристроїв, які підключаються до мережі, вирішують нові типи радіомереж LPWAN (Low Power Wide Area Networks). Найбільш полярними серед таких технологій є LoRa, SIGFOX, NB-IoT, Weightless P і ін. Появу радіомереж нового покоління зумовлено необхідністю підключення безлічі приладів обліку і телеметрії для

централізованого збирання даних на хмарних серверах.

7. Фактором, що дестабілізує роботу радіомереж в умовах тактичного рівня, є високі вимоги до завадозахищеності як природної, так і в умовах застосування противником сучасних засобів радіоелектронної боротьби.

8. Ураховуючи зазначені вище фактори сформульовано наукове завдання дисертаційного дослідження – нову топологію, яка відрізняється від відомих тим, що включає елементи навчання поведінки мережі в умовах завад.

Список використаних джерел у цьому розділі наведено у повному списку використаних джерел під номерами [1–33].

## Розділ 2

### ІНТЕЛЕКТУАЛІЗАЦІЯ РАДІОМЕРЕЖІ

#### **2.1. Дослідження методів штучного інтелекту, що існують в системі підтримання прийняття рішень щодо керування радіомережами**

Сама собою інформація як ресурс теж є об'єктом діяльності і пов'язана з відповідними технологіями – інформаційними технологіями.

В інформатиці штучний інтелект, який іноді називають машинним інтелектом, це інтелект, який демонструють машини, на відміну від природного інтелекту, який використовується людьми. Головна особливість, яка відрізняє інтелектуальну систему від системи, побудованої за традиційною схемою, пов'язана із впровадженням механізмів самонавчання, зберігання та оброблення знань для реалізації здатності з виконання покладених на неї функцій у невизначених умовах та за випадкового характеру зовнішнього впливу. Це може бути непередбачувана зміна мети, експлуатаційних характеристик системи та об'єкта керування, параметрів зовнішнього середовища тощо.

Система керування інформаційною самоналагодженою мережею має досить складну архітектуру, що включає до свого складу ряд функціонально-підлеглих підсистем. Ієрархія їх налагодження зумовлює декомпозицію вихідних цілей і завдань керування. Такий поділ передбачає багаторівневу організацію системи керування, яка має розвинені інтелектуальні можливості з аналізу і розпізнавання обставин, формування стратегії доцільної поведінки, планування послідовності дій, а також синтезу керувальних впливів, спрямованих задовольняти вимоги до обслуговування певних типів трафіку. Організація кожного рівня інтелектуальної системи керування радіомережею передбачає використання сукупності моделей подання знань, інформаційного підтримання, опису контрольованого об'єкта. Головною відмінністю концепції

ієрархічної побудови системи керування самоналагоджувальною мережею є використання методів і технологій штучного інтелекту як основних засобів боротьби з невизначеністю зовнішнього середовища [1].

Упровадження інтелектуальних технологій пояснюється тим, що традиційні технології вже не можуть забезпечити підвищення якості керування, оскільки не враховують усіх невизначеностей, що впливають на систему. Удосконалювання відомих алгоритмів адаптивного керування не завжди дає бажаний результат. Це зумовлюється як складністю самих алгоритмів, так і труднощами їх реалізації з урахуванням умов забезпечення функціональної стійкості систем керування телекомунікаційними мережами, особливо самоналагоджувальними радіомережами. Одним з найскладніших компонентів такої радіомережі є її мобільна компонента – мобільна складова радіомережі. Мобільні радіомережі, які є багаторівневою мобільною компонентою військових мереж, або MANET, це динамічна структура мереж зв'язку з можливістю самоорганізації та адаптації, яка передбачає наявність базових станцій та фіксованих маршрутів передавання інформації [34].

Інтелектуалізація системи керування вузлом мобільної радіомережі – це процес використання технологій оброблення знань для формування правил доцільної поведінки вузла радіомережі залежно від умов, які склалися в її структурі функціонування. Відповідно до цього процесами інтелектуальної системи керування вузлом мобільної радіомережі є такі: збирання і оброблення даних про ситуацію, що склалася в мобільній радіомережі за допомогою спеціалізованих алгоритмів оброблення знань, а також програмних і апаратних засобів для їх перетворення (поповнення бази знань вузла або всієї радіомережі); ефективна поведінка мобільного вузла, що потребує створення методів формування цілей і вирішує завдання керування вузловими та мережевими ресурсами; розпізнавання змін обставин в радіомережі, за якої система керування формує реакцію на них з боку мобільних радіовузлів на основі правил, що містяться в базі знань інтелектуальної системи керування, які

були отримані шляхом навчання [34].

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.

Особливостями радіомереж тактичної ланки керування є: висока динаміка топології, велика розмірність, низька пропускна здатність радіоканалу, неоднорідність вузлів (за продуктивністю, потужністю, мобільністю) та ін.. Більшість типів трафіку чутливі до перевантажень мережі, затримки та втрати пакетів з даними, а отже потребують застосування методів, що належать до різних рівнів моделі OSI і могли б забезпечити їх повноцінне передавання в бездротових мережах з динамічною топологією, до яких належать самоналагоджувальні радіомережі [35-36]. Інтелектуалізація системи керування вузлом мобільної радіомережі – це процес використання технологій оброблення бази знань для формування правил доцільної поведінки вузла радіомережі взаємно від умов, які склалися в її структурі функціонування (рис. 2.1).

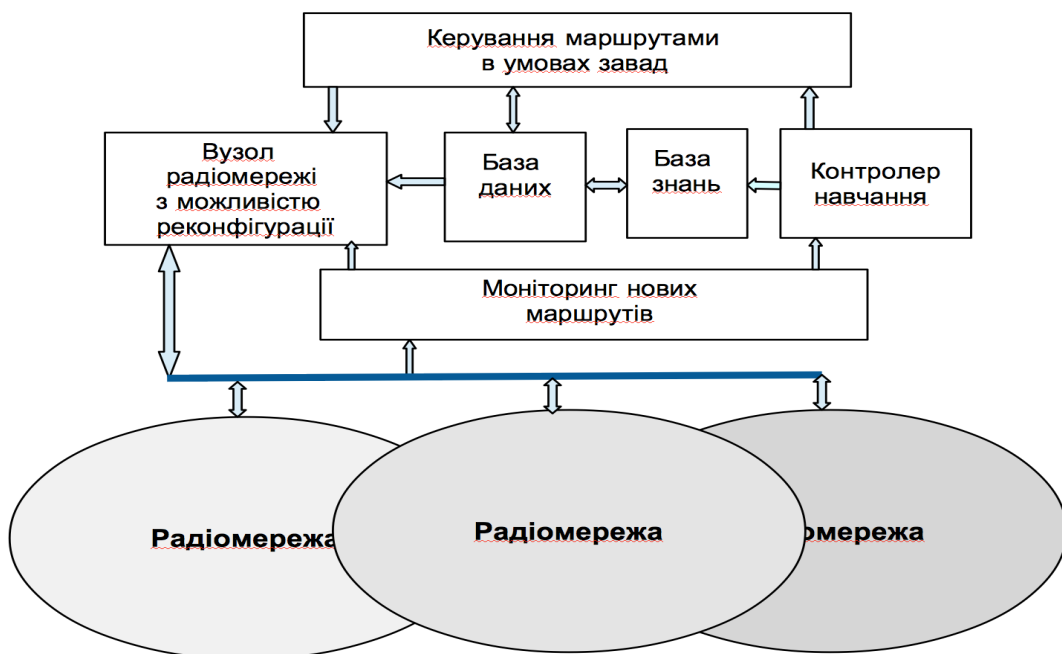


Рис. 2.1. Структура інтелектуалізації системи керування вузлом мобільної

## радіомережі

Здатність радіомережі ( окремого вузла) до пізнання і самонавчання означає її можливість виконувати такі функції:

- проводити моніторинг стану маршрутизації і виявляти нові можливі маршрути, які не використовуються;
- аналізувати параметри радіоканалу, оцінювати передану по каналу інформацію, прогнозувати стан радіоканалу та появу нових маршрутів;
- контролювати рівень потужності випромінювання і керувати процесом реконфігурації радіомережі ( або радіомереж, з якими є зв'язок).

Для виконання цих функцій апаратно вузол радіомережі повинен мати у своєму складі елементи, які забезпечують формування, оброблення маршрутизації (радіоплатформу з можливістю реконфігурації). Пошук нового маршруту мобільної радіомережі в умовах завад представлений на рис 2.2.



Рис. 2.2. Пошук нового маршруту мобільної радіомережі в умовах завад

З метою структурно-логічного опису принципів функціонування системи інтелектуального керування радіомережею використовується поняття «цикли пізнання». Такий цикл може бути поданий у вигляді кібернетичної моделі

OODA (Observe – спостерігай, Orient – орієнтуйся, Decide – вирішуй, Act – дій) [36]. Зазначена модель передбачає багаторазове повторення циклу дій, яка сформована чотирма послідовними взаємодійними процесами: спостереженням, орієнтацією, рішенням, дією керування. Фактично, цикл має розвиток ситуації по спіралі і на кожному етапі цієї спіралі відбувається взаємодія з експлуатаційним середовищем [37]. Навчання припиняється за наявності умов – відсутності завад або шумів, зміни топології, появи нових користувачів.

Розглянемо найбільш використовувані методи аналізу функціонування мобільних радіомереж – методи кластерного і тензорного аналізу.

Кластерний аналіз (data clustering) – один з методів машинного навчання. На відміну від інших методів цей вид аналізу дає можливість класифікувати об'єкти не за однією ознакою, а за декількома одночасно. Для цього вводяться відповідні показники, що характеризують певну міру близькості за всіма класифікаційними параметрами. Мета кластерного аналізу полягає в пошуку наявних структур, що виражається в утворенні груп схожих між собою об'єктів – кластерів.

Завдання кластеризації належать до статистичного оброблення, а також до широкого класу завдань навчання без учителя, на відміну від класифікації - навчання з учителем, де класи визначені заздалегідь [38]. Кластеризація передбачає розбиття множини даних на кластери. Кластери є підмножинами однорідних одиниць сукупності, параметри яких заздалегідь невідомі. Для того щоб дати точне визначення кластера, потрібно знати не тільки умови конкретного завдання, але й те, які саме характеристики використовуються у процесі групування.

Характеристиками кластера можна назвати дві ознаки:

- внутрішню однорідність;
- зовнішню ізолюваність.

Алгоритми кластеризації зазвичай будуються як певний спосіб



перебирання кількості кластерів та визначення його оптимального значення у процесі перебирання і включають п'ять основних кроків:

- відбір вибірки для кластеризації;
- визначення ознак, за якими будуть оцінюватися об'єкти у вибірці;
- обчислення значень тієї або іншої міри подібності між об'єктами;
- застосування кластерного аналізу для створення груп подібних об'єктів ;
- перевірка правдивості результатів кластерного розв'язку.

В основному розглядаються статистичні, ієрархічні та графові алгоритми кластеризації. Конструктивним є алгоритм – це ітераційна процедура, що складається з кроків показаних на рис. 2.3 [38].

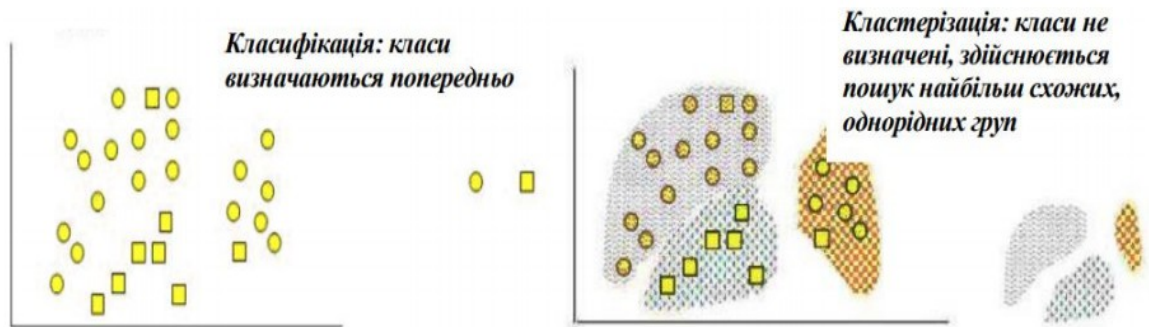


Рис. 2.3. Відмінності класифікації і кластеризації [38]

Під час виконання кластеризації важливо визначити, скільки в результаті цієї процедури має бути побудовано кластерів. Априорі передбачається, що кластеризація повинна виявити природні локальні згущення об'єктів.

Мережеві середовища використовують фізичні величини, які не залежать від вибору системи координат, що застосовується для їх описання. Однак дуже часто ці фізичні величини найбільш зручно вивчати у деякій належним чином обраній системі координат. Математично такі величини подаються тензорами. Тензор як математичний об'єкт існує незалежно від системи координат. Водночас у кожній системі координат його можна задати деякою сукупністю

величин, які називаються компонентами тензора. Якщо компоненти тензора задані в одній системі координат, то вони визначені і в будь-якій іншій системі, оскільки визначення тензора включає закон перетворення його компонент. Фізичні закони мережевого середовища виражаються тензорними рівняннями. Унаслідок лінійності й однорідності тензорних перетворень тензорні рівняння, що є справедливими в одній системі координат, також справедливі й в будь-якій іншій. Тензорний аналіз – це узагальнення векторного аналізу і розділення тензорного обчислення. Він, завдяки своїм можливостям, є логічним способом опису реальних об'єктів у їх багатоаспектності і скперечності. Тензорне подання має максимальну цілісність, дозволяючи сконцентрувати основну увагу на самій системі незалежно від можливих координатних систем її розгляду [39–43]. У зв'язку з цим особливої актуальності набувають дослідження американського вченого Г. Крона та його розробки в галузі тензорного аналізу та діакоптики, які базуються на використанні інваріантних величин - тензорів, які, своєю чергою, подібно каркасу зв'язують перетворення структури складних систем. Можливість сумісного дослідження структури складної системи та процесів, що в ній перебігають, є головною перевагою тензорної методології досліджень, основаної на об'єднанні можливостей диференціальної геометрії з можливостями комбінаторної топології. Поряд з аналізом функціональних рівнянь системи, у межах її тензорного подання, графо-топологічний опис є додатковим джерелом інформації для ефективного складання та розв'язання подібних рівнянь.

У межах дослідження для моделювання було взято за основу фрагмент мобільного компонента перспективної системи зв'язку (рис. 2.4) [39,43] і проведено його геометризацію (рис. 2.5) [39,43], де елементами у вигляді кола  $B1$ – $B6$  можуть бути командні пункти різного рангу, окремі підрозділи, військовослужбовці та ін..

За основу взято процес передавання повідомлення між двома вузлами даного фрагмента. Як приклад, пропонується використати тензорний підхід до

розв'язання задачі багатошляхової маршрутизації команди керування в запропонованій мережі.

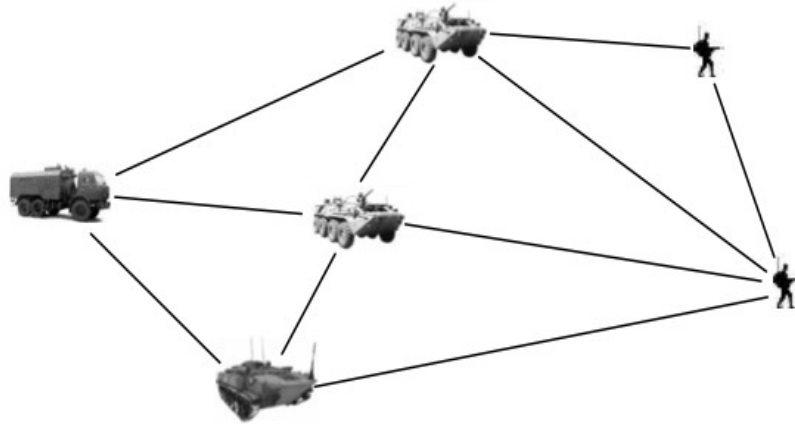


Рис. 2. 4. Фрагмент мобільного компонента перспективної системи зв'язку [39]

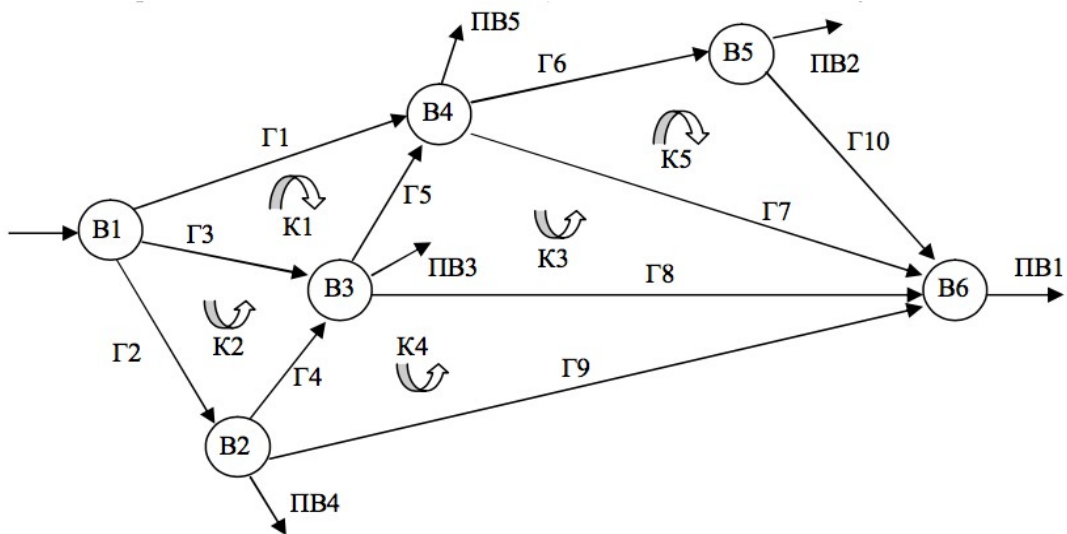


Рис. 2.5. Геометризація фрагмента мобільного компонента перспективної системи зв'язку [39]

У введеному просторі виконаємо тензорний опис системи за допомогою одновалентного тензора довжин повідомлень  $S$  з компонентами  $s_i$ , одновалентного тензора затримок передавання  $T$  з компонентами  $t_j$ , а також

тензора другої валентності  $R$ , координати якого розраховуються за виразом  $r_j^i = s^i t_j$ , ( $i, j=1, n$ ), а у прямому позначенні  $R = S \circ T$ . Кожній структурі мережі відповідає свій набір координат, при цьому кількість координатних шляхів завжди дорівнює кількості гілок [39].

Тензор показує інваріантний геометричний об'єкт, координати якого з перетворенням системи координат змінюються за лінійним законом. Уведемо в розгляд дві координатні системи. Перша – система координат гілок мережі, друга – система координат незалежних контурів і пар вузлів мережі, яка відповідає реальній структурі модульованої системи. Подібний вибір системи координат зумовлений тим, що в системі координат гілок мережі необхідно розрахувати невідомі величини: інформаційне завантаження і величини затримок у кожному тракті передавання системи. У системі координат незалежних контурів і пар вузлів проєкції тензорів  $S$  і  $T$  визначають вихідні дані для розв'язання розрахункових задач: довжину повідомлень і (або) затримку їх передавання [39–43]. Через однакову розмірність уведених координатних систем існують однозначні правила перетворення координат будь-яких геометричних об'єктів з однієї системи координат в іншу. Результативна матриця контраваріантного перетворення  $C$  визначається зі співвідношення (2.1) [39].

$$S_{\Gamma} = C \cdot S_{\text{к.п.в}}, \quad (2.1)$$

де  $S_{\Gamma}$ ,  $S_{\text{к.п.в}}$  – подані у вигляді векторів розмірності  $n$  проєкція одновалентного тензора довжин повідомлень  $S$  у введених вище координатних системах окремих гілок мережі, а також незалежних контурів і пар вузлів.

Використовуючи ідею тензорного аналізу для моделювання процесів функціонування (інформаційного обміну) системи як складного об'єкта, можна одночасно враховувати різні параметри системи (структурні та функціональні), зберігаючи цілісність її розгляду. Результати розрахунку підтвердили можливість і доцільність реалізації запропонованої тензорної моделі багатошляхової маршрутизації команди керування між різними вузлами мережі

на основі фрагмента мобільного компонента перспективної системи зв'язку.

## **2.2. Удосконалення методу аналізу топології радіомережі**

В останні роки додаткового імпульсу розвитку теорії графів надали дослідження в галузі штучного інтелекту й оброблення природної мови. Зокрема, в праці [44] для аналізу тексту поряд з матрицею інцидентності використано матрицю спільної зустрічальності. Цей приклад свідчить про можливість застосування торцевої операції множення матриць і для аналізу топології графу мультирангової мережі в теорії зв'язку.

Один з аспектів структури радіомережі пов'язаний з просторовим розподілом і просторовою взаємозалежністю вузлів мережі та маршрутів передачі інформації. Статистики просторової взаємозалежності вузлів і маршрутів передавання обчислюються за матрицями набору маршрутів передавання (ребер матриці) між найближчими сусідніми вузлами радіомережі. Необхідність розвитку нових підходів до аналізу мультирангових радіомереж з використанням розширених матриць спільної зустрічальності зумовлено декількома факторами: багатовимірністю радіомережі, щільністю розташування і віддаленістю вузлів у просторовій архітектурі та поширеністю мережевих архітектур. Ці фактори і визначили напрями можливого розвитку й узагальнення апарату матриць спільної зустрічальності для вирішення завдань вибору оптимальної маршрутизації в радіомережі, завадостійкості вузлів і в цілому радіомережі із застосуванням активних радіопзавад. Особливої актуальності аналіз за допомогою матриць спільної зустрічальності набуває під час вивчення багаторангових мереж. Можливість сумісного дослідження структури складної системи та процесів, що в ній перебігають, є головною перевагою тензорної методології досліджень, основаної на об'єднанні можливостей диференціальної геометрії з можливостями комбінаторної топології. Розглянемо варіант відповідного використання даної матричної операції для випадку аналізу фрагмента мобільного компонента перспективної

системи зв'язку, зображеної на рис. 2.6 вершинами  $V1-V4$ , який може бути типовим для будь-якої топології .

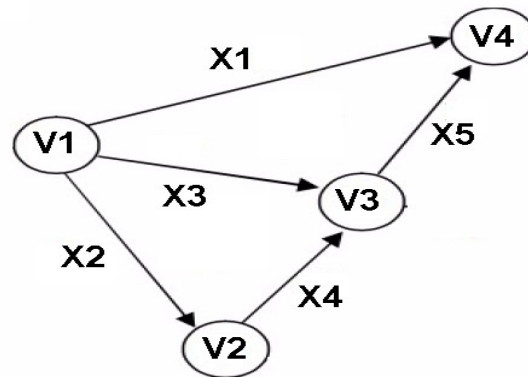


Рис. 2.6 Граф фрагмента тактичної мережі зв'язку.

Складемо для цього фрагмента так звану матрицю інцидентності. Її рядки будуть відповідати вершинам графу топології мережі, а стовпці – його ребрам. При цьому нульове значення в осередку матриці вказує на зв'язок між вершиною і ребром (їх інцидентність). Кількість стовпців має відповідати максимальній кількості ребер в окремо взятому маршруті розглянутої мережі. У зазначеному фрагменті мережі кількість вершин - чотири, вони, своєю чергою, з'єднані п'ятьма ребрами. Перш ніж безпосередньо перейти до аналізу матриці інцидентності, складемо з урахуванням наведеного для наочності їй відповідну таблицю табл. 2.1.

Таблиця 2.1

Порядковий номер вершини	Порядковий номер ребра				
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$
$V_1$	1	1	1	0	0
$V_2$	0	1	0	1	0
$V_3$	0	0	1	1	1
$V_4$	1	0	0	0	1

Якщо провести аналогію з обробленням тексту в праці [44], то вершини графу – вузли зв'язку, будуть в такому випадку еквівалентами слів в тексті, а

маршрути передавання даних (набір ребер) – аналогами пропозицій. Утім, можлива і протилежна асоціація.

Як видно, кожна з вершин  $V1-V4$  контактує з ребрами графа  $X1-X5$  не більше одного разу, тоді як усі ребра з'єднують по дві вершини, оскільки кожен стовпець табл. 2.1 містить пару одиниць. Звідси отримаємо матрицю інцидентності вигляду: квадратична форма на основі зазначеної матриці типу  $G^T G$  іменується матрицею співучасті (co-occurrence matrix) [44]. Дана матриця симетрична щодо своєї головної діагоналі. Відповідно до теорії, елементи поза головною діагоналлю отриманої матриці показують, скільки загальних вершин має окреме ребро з іншими ребрами в уже згадуваному графі.

Таким чином, для отримання інформації про елементи головної діагоналі матриці співучасті можна обійтися без формування самої матриці, що спрощує отримання такої інформації. Однак потреб у формуванні такої матриці зумовлено наявністю в ній додаткової інформації. Щоб пояснити це, перейдемо від матриці  $G^T G$  до еквівалентної таблиці, за допомогою якої можна більш наочно уявити призначення отриманих матричних елементів (табл. 2.2).

Таблиця 2.2

Ребра	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$
$X_1$	2	1	1	0	1
$X_2$	1	2	1	1	0
$X_3$	1	1	2	1	1
$X_4$	0	1	1	2	1
$X_5$	1	0	1	1	2

Числа на перетинах однойменних стовпців і рядків відповідають частоті появи того чи іншого ребра в уже згадуваному фрагменті в разом з вершинами. Слід від квадратичної форми  $tr(G^T G)$ , який дорівнює сумі діагональних елементів квадратичної матриці, відповідає повній кількості з'єднань вершин з ребрами (без урахування повторюваності ребер). У цьому випадку така величина дорівнює десяти.

Якщо відняти із матриці  $G^T G$  подвоєну одиничну матрицю, то можна

отримати традиційну матрицю суміжності ребер [45,46]. У результаті її множення зліва на вектор-рядок одиниць можна сформувавши важливий для аналізу навантаження в мережі вектор-рядок, елементи якого вкажуть на кількість ребер, з якими з'єднане дане ребро за допомогою контакту в одній з вершин графу.

Щоб отримати додаткову статистику про вершини графу, слід розрахувати альтернативну квадратичну форму  $-GG^T$ . У розглянутому прикладі якщо обнулити у сформованій матриці елементи головної діагоналі, то отримаємо традиційну матрицю суміжності вершин графу [45,46]. При цьому матриця  $GG^T$  є більш інформативною, оскільки, елементи на її головній діагоналі відповідають кількості ребер, що виходять з тієї чи іншої вершини (табл. 2.3). Наприклад, з першої і третьої вершин виходять по три ребра, а з другої й четвертої – по два (ребра в стовпцях нумеруються зліва направо, а в рядках - зверху вниз). У традиційній матриці суміжності таку інформацію можна було отримати підсумовуванням елементів у стовпцях або множенням матриці праворуч на вектор одиниць. Елементи в рядках і стовпцях поза головною діагоналлю матриці  $GG^T$ , як і в  $L$ , указують на наявність загальних ребер у відповідній парі вершин. Наприклад, з першого рядка слід, який має перша, вершина має загальні ребра з усіма іншими, а ось з другого рядка матриці слід, що друга і четверта вершини не мають спільних ребер у розглянутій топології графу.

Таблиця 2.3

Вершини	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_4$
$V_1$	3	1	1	1
$V_2$	1	2	1	0
$V_3$	1	1	3	1
$V_4$	1	0	1	2

Розібравшись з основними можливостями класичного матричного апарату, який застосовується для аналізу графів, перейдемо далі до



найскладнішого завдання аналізу більшої кількості поєднань ребер і вершин за аналогією із працею, для чого необхідно скористатися торцевим добутком матриць. Зокрема, для аналізу парних з'єднань елементів графу відправною точкою має стати матриця інцидентності, сформована з вихідної матриці  $G$  для окремо взятих слів за допомогою формули (2.2):

$$I = G \square G, \quad (2.2)$$

де  $\square$  - символ торцевого добутку матриць (зводиться до кронекеровського добутку рядків лівої матриці на рядок правої [47–50]).

Для розглянутого випадку отримаємо: для пояснення змісту елементів отриманої матриці, яку будемо називати вторинною матрицею інцидентності, знову звернемося до табличної форми подання даних (табл. 2.4). По-іншому результат можна трактувати як кількість вершин, що перетинаються в маршруті, утвореному конкретним з'єднанням пар ребер.

Таблиця 2.4

Номер вершини	Комбінації ребер																							
	$X_1$					$X_2$					$X_3$					$X_4$					$X_5$			
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4
$V_1$	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$V_2$	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0
$V_3$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1
$V_4$	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0

Можливий також інший варіант, коли для формування вторинної матриці інцидентності за допомогою торцевого твору використовується транспонована матриця  $G^T$ . У цьому випадку можна аналізувати статистику перетинання пар вершин за допомогою тих чи інших ребер.

Зазначена альтернативна версія матриці інцидентності така: її елементи представлені також у табл. 2.5, у якій рядки відповідають ребрам, а стовпці – вершинам. Із табл. 2.5 легко отримати повне уявлення про те, якими ребрами з'єднана конкретна пара вершин.

Таблиця 2.5

Номер ребра	Комбінації вершин														
	$V_1$				$V_2$				$V_3$				$V_4$		
	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_4$	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_4$	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_4$	$V_1$	$V_2$	$V_3$
$X_1$	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
$X_2$	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$X_3$	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0
$X_4$	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0
$X_5$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1

Нульовий стовпець означає відсутність ребра, що з'єднує конкретні вершини. Наприклад, цей випадок має бути для другої і четвертої вершин ( $V_2V_4$ ,  $V_4V_2$ ). При цьому за парою, утвореною дублюванням однієї і тієї ж вершини ( $V_mV_m$ ), можна з'ясувати скільки ребер з'єднано з цією вершиною.

Як відомо із праці [44], матриця спільної зустрічальності для аналізу парних з'єднань може бути сформована на основі добутку вихідної матриці інцидентності і її версії у вигляді торцевого добутку альтернативних вторинних матриць інцидентності: отримана в результаті матриця має розмірність  $16 \times 4$  і може бути подана у вигляді 4 блоків, кожен з яких відповідає одній з вершин в їх парних сполученнях (табл. 2.6).

Таблиця 2.6

Вершини	$V_1$				$V_2$				$V_3$				$V_4$		
	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_4$	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_4$	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_4$	$V_1$	$V_2$	$V_3$
$V_1$	3	1	1	1	1	1	0	0	1	0	1	0	1	0	0
$V_2$	1	1	0	0	1	2	1	0	0	1	1	0	0	0	0
$V_3$	1	0	1	0	0	1	1	0	1	1	3	1	0	0	1
$V_4$	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1

На головній діагоналі кожного з цих блоків розташовані числа, що показують, скільки разів у всьому графі перетинається та чи інша пара вершин для формування будь-якого ребра. При цьому елементи поза головною діагоналлю конкретизують, які саме пари вершин у досліджуваному графі формують ребра без урахування їх порядку в послідовності вершин.

Істотно, що елемент на головній діагоналі дорівнює сумі всіх інших

елементів рядка або стовпця поза головною діагоналлю. Слід, узятий окремо для кожного з блоків як суму елементів їх головної діагоналлю, показує, скільки ребер у даному графі утворює конкретна вершина разом з іншими вершинами та між собою.

Розглянемо матрицю спільного народження для вихідної конструкції матриці інцидентності, відповідною статистикою розподілу вершин по ребрах (табл. 2.7) :

Таблиця 2.7

Номер ребра	$X_1$					$X_2$					$X_3$					$X_4$					$X_5$				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
$X_1$	2	1	1	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
$X_2$	1	1	1	0	0	1	2	1	1	0	1	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0
$X_3$	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	2	1	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1
$X_4$	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	1	1	0	1	1	2	1	0	0	1	1	1
$X_5$	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	1	1	2

Усі блоки отриманої матриці симетричні відносно головної діагоналлю. Елементи матриці показують, скільки загальних вершин має конкретна пара або трійка ребер.

Таким чином, використання торцевого добутку матриць дозволяє розширити можливості аналізу топології тактичної мережі, автоматизувати окремі його етапи шляхом формування матриць інцидентності і спільної зустрічальності другого і найвищих порядків. При цьому порівнянно з використанням кронекеровського добутку матриць торцевий добуток дозволяє скоротити обсяги обчислювальних витрат і спростити вимоги до пристроїв зберігання даних, особливо для мереж, топологія яких описується графами з великою кількістю вершин і ребер [50].

## Висновки за розділом 2

1. Досліджено поведінку мобільної радіомережі за допомогою тензорного методу. Використання методу матричного аналізу для

моделювання процесів функціонування (інформаційного обміну) радіомережі як складного об'єкта дає можливість моделювати ефективні системи керування радіомережею.

2. Удосконалений метод аналізу топології радіомережі. Сутність методу полягає у використанні торцевого добутку матриць, що порівнянно з використанням кронекеровського добутку матриць, дозволяє розширити можливості аналізу топології мережі, автоматизувати окремі його етапи шляхом формування матриць інцидентності і спільної зустрічальності другого і найвищих порядків, скоротити обсяги обчислювальних витрат і спростити вимоги до пристроїв зберігання даних, особливо для радіомереж, топологія яких описується графами з великою кількістю вершин та ребер.

Список використаних джерел у цьому розділі наведено у повному списку використаних джерел під номерами [34–50].

## Розділ 3

### НАЛАШТОВУВАННЯ РАДІОМЕРЕЖІ

#### 3.1. Інформаційна технологія самоналагоджувальної радіомережі тактичного рівня

Інформаційна технологія полягає у новому методу самоналаштування радіомережі на основі градієнтного підходу, що відрізняється від відомих інтеграцією градієнтного алгоритму налаштування ваги сусідніх вузлів і пошуку найкоротшого маршруту в мережі, що зазнає впливу завад.

Інформаційна технологія — цілеспрямована організована сукупність інформаційних процесів з використанням засобів обчислювальної техніки, що забезпечують високу швидкість обробки даних, швидкий пошук інформації, розосередження даних, доступ до джерел інформації незалежно від місця їх розташування. Інструментарій інформаційної технології — один або кілька взаємопов'язаних програмних продуктів для певного типу комп'ютеризованої системи, технологія роботи якої дозволяє досягти поставленого користувачем завдання. Інформаційні технології мають такі властивості: високий ступінь розчленованості процесу на стадії, що відкриває нові можливості для його раціоналізації і перекладу на виконання за допомогою машин — найважливіша характеристика технологічного процесу; системна повнота (цілісність) процесу, що повинний включати весь набір елементів, що забезпечують необхідну завершеність дій людини при досягненні поставленої мети; регулярність процесу й однозначність його фаз, що дозволяють застосовувати середні величини при їхній характеристиці, і, отже, що допускають їхню стандартизацію й уніфікацію. У результаті з'являється можливість обліку, планування, диспетчеризації інформаційних процесів.

Як інструментарій можна використовувати такі поширені види програмних продуктів: операційні системи, текстовий процесор (редактор), настільні

видавничі системи, електронні таблиці, системи керування базами даних, програми для обробки відео та аудіопотоків, програми оброблення картографічної інформації та систем навігації, експертні системи та ін.. Компоненти інформаційної технології самоналагоджувальної радіомережі показані рис. 3.1.

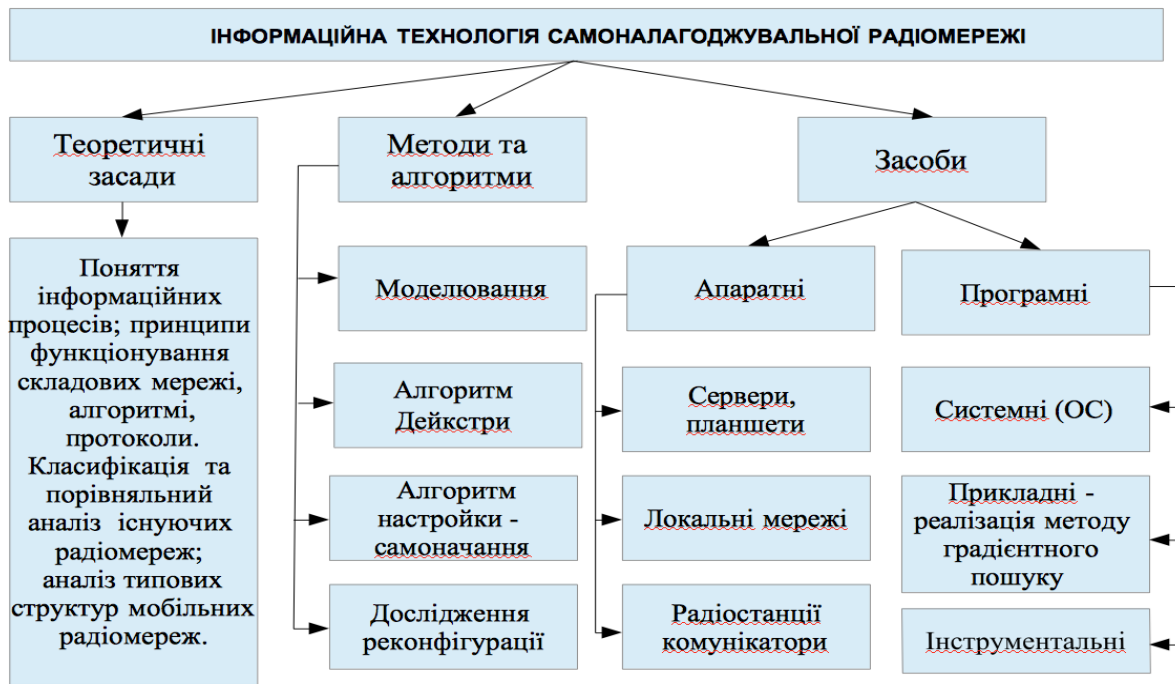


Рис. 3.1. Компоненти інформаційної технології самоналагоджувальної радіомережі

Запропонована інформаційна технологія відповідає критеріям концепції C4ISR (Command, Control, Communications, Computers, Intelligence, Surveillance and Reconnaissance), що є базовими для переходу збройних формувань України на нову організацію ведення військових дій. Суттю концепції є сукупність організаційних і технічних атрибутів та процесів, які використовують людські, технологічні та інформаційні ресурси для розв'язання проблем і виконання місій. Основними компонентами C4ISR є відкрита архітектура та стандартизовані інтерфейси, стандарти НАТО, вимога модульності, компоненти кібербезпеки, організація колективного простору та ін..

Неодмінною частиною такої технології є самоналагоджувальні радіомережі, які характеризуються динамічною топологією, обмеженим енергетичним ресурсом вузлів. Через використання в багатьох терміналах і ретрансляторах у польових умовах акумуляторних батарей, для таких мереж і їх мобільних компонентів характерні неоднорідності за потужністю випромінювання. Вузли радіомережі весь час повинні швидко адаптуватися до частих змін топології й ефективно використовувати обмежені мережеві ресурси. Фактором, що дестабілізує роботи радіомереж тактичного рівня, є високі вимоги до завадозахищеності як природної, так і в умовах застосування противником сучасних засобів радіоелектронної боротьби. У таких умовах самоналагоджувальні мережі не можуть забезпечити якісний інформаційний обмін без ефективної системи керування радіомережами. Абоненти виконують інформаційний обмін безпосередньо між собою або використовують ретрансляцію (маршрутизацію) повідомлень у межах своєї закритої військової VPN самоналагоджувальної радіомережі.

Децентралізовані мобільні мережі MANET (MobileAd-hocNetwork) – радіомережі з топологією без базових станцій здатні до самоорганізації. Розглядається концепція дворангових мереж MANET. Передбачається, що перетворення тимчасової мережі MANET до дворангової топології дасть змогу поліпшити роботу мережі, зокрема таких її параметрів, як пропускна здатність, середня затримка та завадостійкість (рис. 3.1).

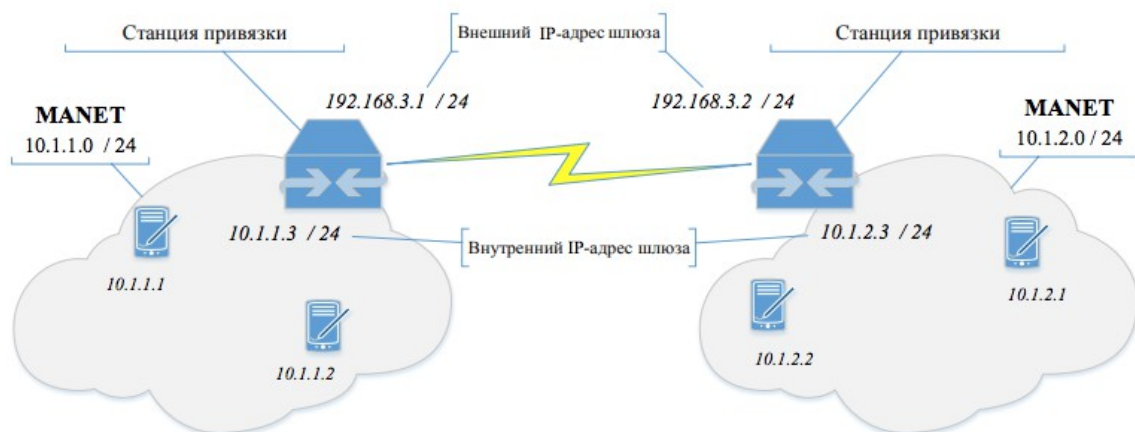


Рис. 3.1. Сегмент взаємодії підмереж у дворанговій мережі MANET [51]

Запропонована модель радіомережі, у якій другий рівень (командир групи) оснащується комунікатором з мінімум дво- або багаторанговою системою комунікації на частотах 2,4–2,498 ГГц та 5,6–18 ГГц, для зв'язку і забезпечення комунікації з вищим рівнем та входом в опорну мережу. Це мультирангова модель радіомереж MANET.

Перший радіоінтерфейс станцій прив'язки використовується для обміну інформацією всередині підмережі MANET, другий інтерфейс - для спілкування між підмережами. При цьому потужність передавання у радіоінтерфейсів такого вузла значно вища, ніж у звичайних вузлів, що мають тільки один інтерфейс для зв'язку всередині мережі.

Узагальнена структура інтелектуальної системи керування вузлом мобільної радіомережі (рис. 3.2) повинна бути реалізована всіма елементами радіомережі, зокрема центром керування мережею, базовими станціями та мобільними користувачами (вузлами).

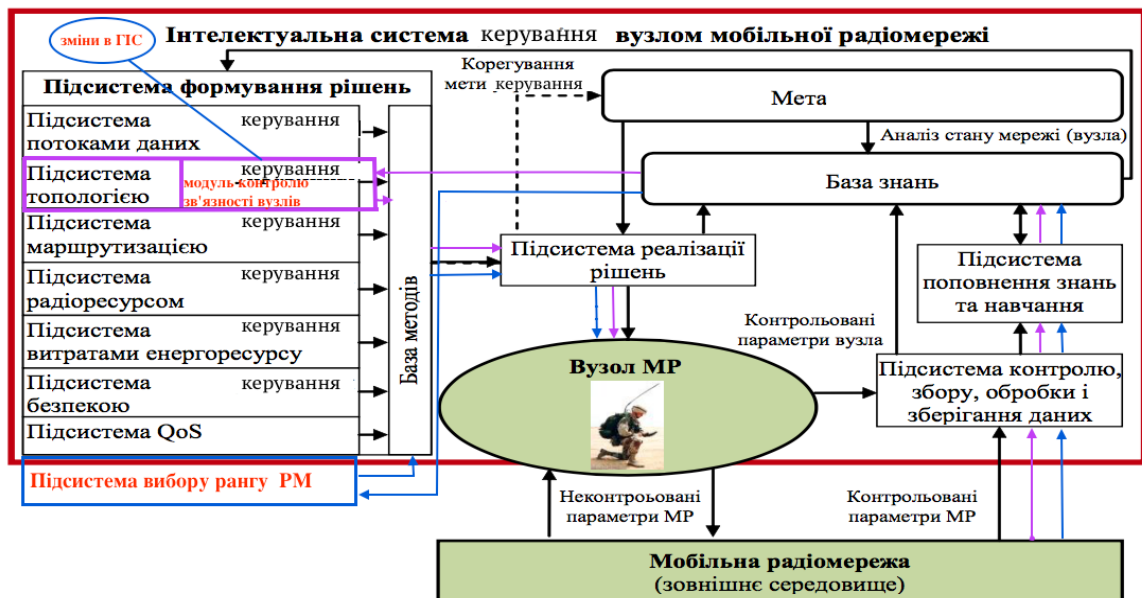


Рис. 3.2. Структура інтелектуальної системи керування вузлом мобільної радіомережі [52]



Запропонована модель інтелектуальної системи керування (ІСК) вузлом мобільної радіомережі має досить складну структуру і включає до свого складу низку функціонально-підлеглих підсистем. Така організація системи керування вузлом дозволяє йому мати розвинені інтелектуальні можливості аналізувати і розпізнавати обставини, формувати стратегію доцільної поведінки, планувати послідовність дій, а також виконувати керувальних впливів, спрямованих на задоволення вимог до обслуговування різних типів трафіку. Головна особливість, яка відрізняє запропоновану інтелектуальну систему керування від побудованої за традиційною схемою, полягає у підключенні механізмів зберігання й оброблення знань (блок «база знань») для реалізації здатності виконувати необхідні функції в умовах невизначеності (неповноти інформації) за випадкового характеру зовнішніх впливів. У базі знань міститься інформація про принципи побудови системи керування та мету її функціонування, специфіку використання різних методів керування, а також особливості функціонування підсистеми реалізації рішень та самого об'єкта керування. Крім того, до складу системи керування, у разі потреби, може входити підсистема поповнення знань та навчання, яка узагальнює нагромаджений досвід і, таким чином, поповнює базу новими знаннями [52]. Підсистема контролю, збирання, оброблення і зберігання даних призначена для вимірювання контрольованих параметрів мобільних вузлів та радіомережі в цілому. Підсистема формування рішень побудована за принципом функціональності керування, який передбачає об'єднання функцій системи керування у відносно незалежні групи, що дозволяє здійснити декомпозицію керування мережею на підсистеми (що значно спрощує розроблення математичного забезпечення керування).

Алгоритм кластеризації починається з відбору вибірки для кластеризації в підсистемі контролю, збирання, оброблення і збереження даних. Визначення ознак, за якими будуть оцінюватися об'єкти у вибірці, та обчислення значень міри подібності між об'єктами відбуваються в підсистемі поповнення знань і

навчання згідно зі структурою, зображеною на рис. 3.2. Алгоритм Дейкстри є процедурою пошуку найкоротшого шляху на зваженому орієнтованому графі. Алгоритм використовується протоколами маршрутизації OSPF і IS-IS в IP-мережі, якою є самоналогоджувальна 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 багатошарової нейронної мережі BP (back propagation – зворотне поширення помилки). Це ітераційний метод градієнтного пошуку найкращих параметрів у даних умовах, що характеризується простотою класифікаційного завдання з точки зору «вхід–вихід» та надійністю роботи. Програмну реалізацію методу градієнтного пошуку подано у дод. Д. Методи завадостійкого кодування у радіомережі з використанням турбокодера (з двома становими кодерами або з використанням турбокодів сумісних з кодами Ріда-Соломона) реалізуються підсистемами контролю, збирання, оброблення і зберегання даних та керування радіоресурсом.

У дисертації вдосконалено модель перспективної (еталонної) інтелектуальної системи керування - вбудовуються вузли мобільної радіомережі, і містять елементи дво- або багаторангової системи комунікації. Під час роботи в умовах активних завад така архітектура дозволяє переводити всю радіомережу на іншу смугу частот. У модель ІСК вузлом мобільної радіомережі вводиться підсистема вибору рангу радіомережі як новий елемент мобільної радіомережі [14, 15].

Алгоритм функціонування цієї підсистеми містить такі етапи:

- формування підсистеми контролю, збирання, оброблення та зберігання таких випадків, за яких вузол перевантажується сигналом активної завади або шумами;

- аналізування показників функціонування вузла та мобільної радіомережі;
- виконання перехолу вузла і всієї радіомережі на інший ранг (смугу частот), якщо певні показники функціонування мережі не задовольняють вимоги функціонування вузла і мобільної радіомережі.

Підсистема керування топологією моделі ІСК вузлом мобільної радіомережі доповнюється модулем контролю зв'язності вузлів мобільної радіомережі, який формує реагування підсистеми контролю топології на зміни форми конфігурації мобільних абонентів (вузлів) радіомережі в русі і відображає зміни в системі ГС. Моделювання та аналіз змін топології мобільної радіомережі та візуалізація отриманих результатів проведені за допомогою геоінформаційної системи ArcGIS 10. Модуль ArcGIS Geostatistical Analyst - забезпечує геостатистичний аналіз і моделювання просторових даних, включаючи надання інтерактивних графічних засобів підбору статистичних параметрів моделей просторових розподілів. Результати такого аналізу подано в розділі 4 (підрозділ 4.2).

### **3.2. Самоналагоджувальна радіомережа в умовах завад**

У попередніх розділах описано системи керування інформаційною радіомережею, яка має розвинені інтелектуальні можливості з аналізу і розпізнавання обставини формування стратегії доцільної поведінки, планування послідовності дій, а також синтезу керувальних впливів, спрямованих задовольнити вимоги до обслуговування певних типів трафіку. У цьому розрізі виконаємо аналіз функціонування підсистеми керування безпекою [53–60] та розглянемо способи підвищення заводо захищеності з використанням методів штучного інтелекту в системі підтримання прийняття рішень щодо керування мобільною радіомережею. Усі компоненти та вузли радіомережі функціонують у загальному радіосередовищі і тому вони уразливі для потенційних атак противника. Результатами деструктивних дій на

самоналагоджувальну радіомережу можуть стати як сканування і контроль трафіку, так і повна дезорганізація її роботи. Класифікацію атак показано на рис. 3.3 [53].

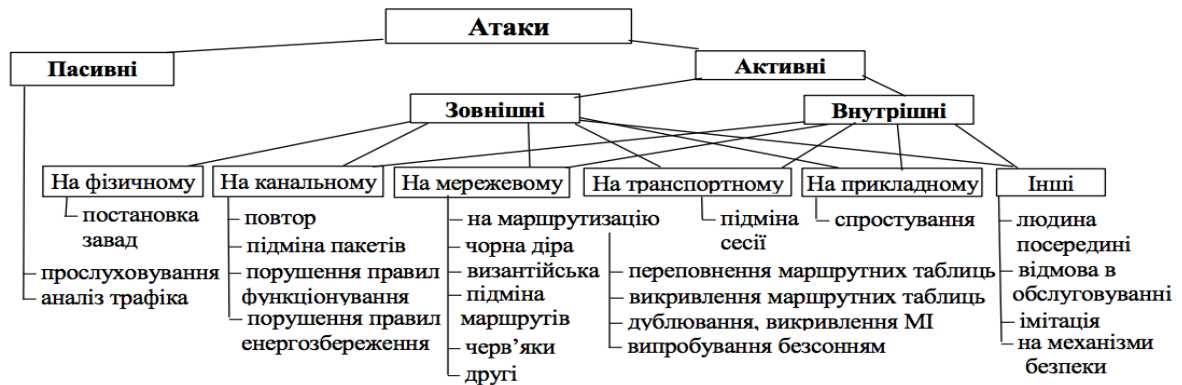


Рис. 3.3. Класифікація атак на радіомережу [53]

Реалізація активних атак у самоналагоджувальній радіомережі можлива на всіх рівнях еталонної моделі взаємодії відкритих систем. На фізичному рівні противник може здійснити постановку перешкоди. На каналному рівні атаки спрямовані на порушення правил функціонування протоколів каналного рівня зв'язку в умовах впливу організованих і ненавмисних завад, а також забезпечення багатовузлового доступу під час роботи в пакетних радіомережах найкращим чином може бути реалізовано з використанням складних і шумоподібних сигналів, оскільки це дозволить підвищити завадозахищеність, приховування і безпеку роботи радіомереж.

Системи зв'язку із широкосмуговими сигналами займають особливе місце серед різноманітних систем зв'язку, що пояснюється їхніми властивостями і є основною перспективних мереж військового призначення. По-перше, вони мають високу завадозахищеність від дії сильних завад, по-друге – забезпечують кодову адресацію великої кількості абонентів і їх кодове розділення під час роботи в загальній смузі частот, по-третє, вони забезпечують сумісність передавання інформації з виміром параметрів руху об'єкта в системах рухомого зв'язку.

Розглянемо сучасні технології, що забезпечують захист інформаційних потоків радіомереж від завад – це MIMO (Multiple Input Multiple Output), (DSSS – Direct Sequence Spread Spectrum) та OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Технологія MIMO являє собою використання декількох антен на передавальній стороні й декількох антен на приймальному боці, що дозволяє значно підвищити пропускну здатність і/або стійкість системи зв'язку порівнянно з традиційною системою. Інший напрям реалізації принципу MIMO – використання ортогонального кодування (як правило, за фазою) сигналів незалежно випромінюваних різними антенними елементами. Характерний приклад - застосування MIMO у пристроях стандарту IEEE 802.11 [54]. Один з можливих підходів до реалізації ортогонального кодування полягає в розширенні спектра сигналу, що передається методом прямої послідовності DSSS. Суть технології DSSS полягає в заміні кожного біта (або груп бітів) вихідного потоку даних якоюсь псевдовипаковою (шумоподібною) кодовою послідовністю [54]. Для досягнення високої швидкості передавання шляхом одночасного передавання даних по всіх підканалах можливе за допомогою технології OFDM. У сигналах з OFDM використовують частотні канали, які значно перекриваються за частотного рознесення сусідніх каналів. У цих умов сигнали в різних каналах виявляються взаємно ортогональними, що зумовлює відсутність міжканальних завад. Структуру сигналу технології OFDM показано на рис. 3.4 [54].



Рис. 3.4. Структура технології OFDM з ортогональними опорними частотами [54]

Найбільш істотними ознаками сучасних і перспективних бездротових цифрових систем передавання [54], які відрізняють їх від засобів бездротових систем передавання попередніх поколінь, є застосування режиму OFDM [55–57] для розподілу інформаційних ресурсів між багатьма користувачами з одночасним використанням різних видів багатопозиційної модуляції [58] для підвищення загальної продуктивності бездротової системи передавання і залучення властивостей наддовгих надлишкових блокових кодів LDPC (Low Density Parity check Codes – коди з низькою щільністю перевірок на парність) для забезпечення необхідної достовірності [59,60]. Види багатопозиційної модуляції і завадостійкі блокові коди LDPC поєднуються в сигнально-кодові конструкції, що дозволяють забезпечувати високу швидкість передавання інформації кожному користувачу, необхідну вірогідність передавання інформації та максимальну інформаційну ефективність радіосистеми передавання при застосуванні режиму OFDM [61–63].

Інформаційна технологія полягає у новому методу самоналаштування радіомережі на основі градієнтного підходу, що відрізняється від відомих інтеграцією градієнтного алгоритму налаштування ваги сусідніх вузлів і пошуку найкоротшого маршруту в мережі, що зазнає впливу завад.

Розглянемо математичну модель інтелектуального керування маршрутизацією у радіомереж нестабільної топології в умовах завад. Сенсорна радіомережа, 0-рівень запропонованої перспективної архітектури радіомережі є розподіленою самоорганізованою мережею збирання і передавання даних до певного хоста або до зовнішньої мережі через інші сенсори з використанням бездротового каналу передавання даних. Така мережа має радіуси взаємодії з вузлами, які можуть перевищувати граничноприпустимі. У такому разі вибір топології такої сенсорної радіомережі має безпосередній вплив на вибір протоколів, параметрів каналів вузлів, що взаємодіють, та маршрут передавання даних. Проблема, процедура вирішення якої розглядається,

полягає у розробленні моделі, заснованої під час створення методу інтелектуального керування маршрутизацією в радіомережах нестабільної топології, які побудовані на основі сервісорієнтованої архітектури в умовах конфлікту, обмежень та невизначеностей. Математична модель сенсорної радіомережі передавання даних може бути подана зв'язаним графом (3.1) :

$$G = (V, E), \quad (3.1)$$

де  $V$  – множина вузлів графу, що являє собою радіомережу сенсорів;  $E$  – множина ребер графу, що з'єднує вузли і показує можливий маршрут передавання даних.

Радіомережа має певну топологію, що описується зваженим графом, який має вигляд формули (3.1).

*Алгоритм Дейкстри.* Цей алгоритм є процедурою пошуку найкоротшого шляху на зваженому орієнтованому графі (рис. 3.5).

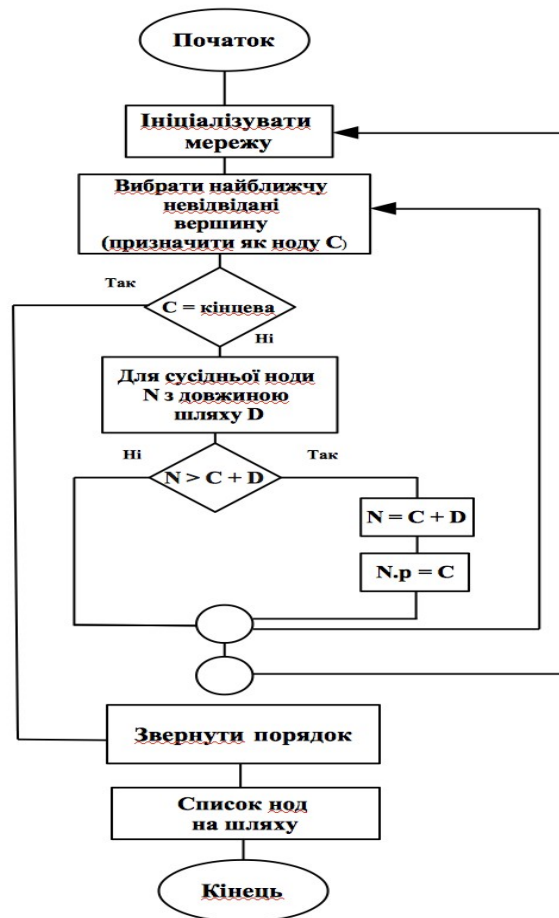


Рис. 3.5. Блок-схема алгоритму Дейкстри

Якщо мережу подавати орієнтованим графом, тоді ваги  $w_{ij}$  ребер графу запропоновано розраховувати в залежності від пропускної здатності  $c_{ij}(t)$  за формулою

$$w_{ij} = \frac{10^8}{c_{ij}(t)} \quad (3.2)$$

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 (3.3) може бути записаний як

$$\bar{c}_{ij}(t) = \begin{cases} c_{ij} + \Delta, & \text{якщо } c_{ij} < x_{ij}, \\ c_{ij}, & \text{якщо інакше,} \end{cases} \quad (3.3)$$

Довжина шляху (3.4) на кожному кроці  $k$  від вершини  $s$  визначається правилом

$$L_k = \min_V [L(k), L(V) + w_{ij}] \quad \text{для } V \notin G, L(s) = 0. \quad (3.4)$$

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

Правило (3.4) не дозволяє робити проходи по дугах графу  $G$  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  $k$ , від вузла  $V1$  до  $V6$ , як показано на рис. 3.6 стрілками [64].



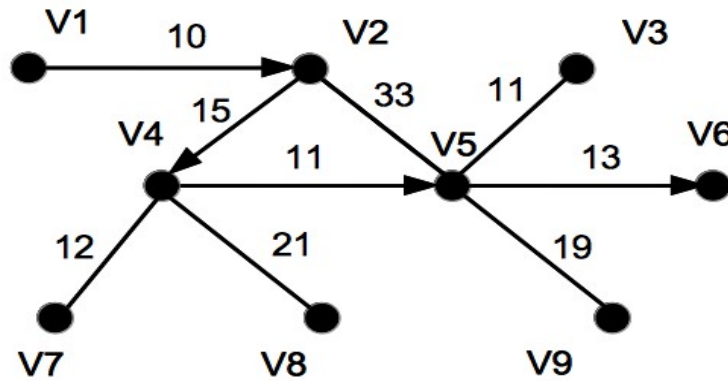


Рис. 3.6. Структура зваженого графу [64].

Кружками позначено вузли радіомережі  $V1...V9$ , лініями – шляхи між ними (ребра графу). Поруч з кружками позначено номери вузлів мережі, над ребрами позначено їх вагу – довжину шляху. Алгоритм працює покроково, починаючи з першого вузла радіомережі – на кожному кроці він «відвідує» один вузол і намагається зменшувати мітки. Алгоритм закінчує роботу, коли всі вузли радіомережі відвідані з  $V1$  по  $V9$ . Результат роботи алгоритму видно на рис. 3.5: найкоротший шлях від вершини  $V1$  до вершини  $V2$  становить 10, до вершини  $V4$  - 25, до вершини  $V5$  - 36, до вершини  $V6$  - 49.

Оскільки алгоритм є ітераційним, то кількість ітерацій визначається кількістю вершин графу, тому часова складність алгоритму  $O(N)$ . У межах кожної ітерації відбувається нове проходження з урахуванням нової  $(j+1)$  вершини. При цьому вершини з найбільшою вагою вивільняються, а довжина шляху з новими вершинами поновлюється, кращий результат запам'ятовується. Це також оцінюється кількістю вершин. Загальна продуктивність алгоритму оцінюється величиною  $O(N^2)$ . Таким чином, алгоритм Дейкстри є ресурсомістким, але завдяки знанням топології мережі і шляху до потрібної вершини маршрутизатор завжди знаходить альтернативний шлях до потрібного вузла мережі у випадку виникнення проблем у будь-якому вузлі визначеного шляху.

Резервування перепускної здатності повинно враховувати навантаження мережі. Для контролю маршрутизатор доповнюється засобами вимірювання навантаження, які будуть створювати аналогічно (3.4) матрицю навантажень  $X = |x_{ij}|$ . Тоді алгоритм з резервуванням трафіку (3.5) може бути записаний як

$$\begin{aligned} \hat{c}_{ij} &= c_{ij} + \Delta, \text{ якщо } c_{ij} < x_{ij}; \\ \hat{c}_{ij} &= c_{ij}, \text{ якщо інакше,} \end{aligned} \quad (3.5)$$

де  $\Delta$  – частка, що компенсує перевантаження.

Зменшення ресурсомісткості можна досягти зменшенням кількості ребр, тобто переходом до розрідженого графу [64].

Оброблення радіосигналів у приймальній системі радіомережі на основі частотної фільтрації, ізоляція сигналу від фону шуму шляхом порогового оброблення та виконання символного декодування прийнятої інформації. Передбачається, що приймання радіосигналів відбувається в умовах шумів що інтерферують, тобто природа шуму невідома, однак має сенс припустити, що шум має гаусовий розподіл з нульовим середнім значенням. Рівень шумів, що заважають, при цьому результатом декодування є неправильна ідентифікація символів і отримується нечитабельна інформація. Як можливе вирішення в контексті проблеми розглядається оброблення зашумленої інформації нейронною мережею, яка має властивості розпаралелювати оброблення інформації та отримувати розумний результат шляхом самонавчання. Самонавчання є ключовим для розв'язання складних проблем, які неможливо вирішити звичним способом. Проблема побудови такої мережі полягає у виборі інваріантних ознак, які описують вхідну інформацію так, що різниці викликаються лише випадковими факторами, наприклад, шумом. У цьому випадку інформативними ознаками вважатиметься векторне подання символів, на які накладено компонент шуму або навмисної завади.

*Алгоритм налаштування.* Серед багатьох типів нейронних мереж, включаючи глибинне навчання, широко використовується структура нейронної

мережі ВР (back propagation) оскільки вона має властивості самоналаштування, а розпізнавання є обчислювально ефективним (рис. 3.7).

Ітеративний градієнтний алгоритм, який використовується з метою мінімізації помилки роботи багатoshарового перцептрону та отримання результату на виході. Основна ідея цього методу полягає в поширенні сигналів помилки від виходів мережі до її входів, в напрямку, зворотному прямому поширенню сигналів у звичайному режимі роботи. Кожен нейрон мережі включає адаптивний суматор, розв'язальний пристрій та механізм зворотного зв'язку.

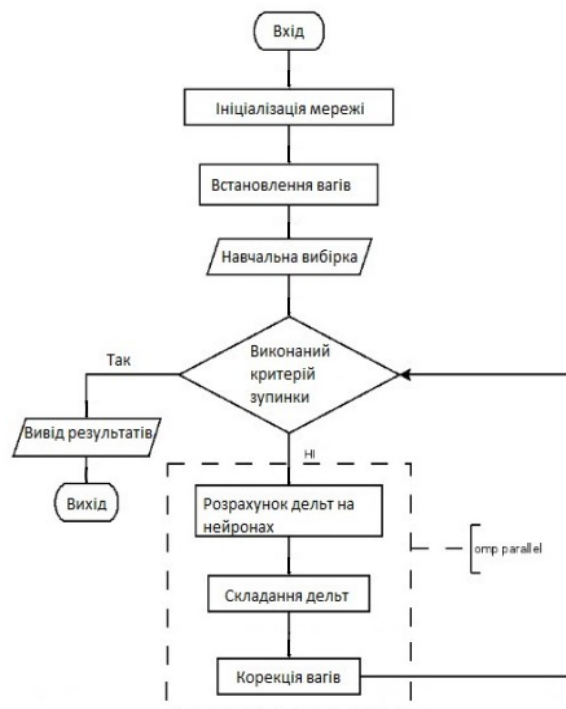


Рис. 3.7. Блок-схема алгоритму паралельного навчання [65]

Адаптивний суматор підсумовує входні сигнали  $x_i$  нейрона (3.6) з певною вагою  $w_i$  [66]:

$$v = \sum_{j=1}^N x_j w_j \quad (3.6)$$

Тут  $v$  – вихід адаптивного суматора. Корегування шкал проводиться за алгоритмом (3.7)

$$w_j(n+1) = w_j(n) + \Delta w_j(n), \quad (3.7)$$

де  $w_j$  - ваговий коефіцієнт  $j$ -го нейрона,  $n$  - порядковий номер ітерації виправлення  $w_j$ , а  $\Delta w_j$  – поправка, обчислена як (3.8)

$$\Delta w_j(n) = k e_j(n), \quad (3.8)$$

де  $k$  – коефіцієнт, що визначає швидкість мережевого налаштування,  $e_j(n)$  - сигнал корекції помилки, що діє на вході нейрона, і визначається (3.9) наступним чином

$$e_j(n) = d_j(n) - x_j(n) w_j(n), \quad (3.9)$$

де  $d_j(n)$ ,  $x_j(n)$  – бажаний вихід і вхід  $j$ -го нейрона на  $n$ -ій ітерації постанови [66].

Існує два основні підходи для забезпечення глобальної збіжності алгоритму налаштування. Перший заснований на контролі коефіцієнта  $k$ , від якого залежить значення кроку коригування тоді як у зоні, далекій від оптимального розв'язку  $k < 1$ , у зоні, що наближається до оптимальної настройки, встановлено  $k = 1$ . Другий підхід — використання методу нелінійної оптимізації (Левенберга–Марквардта), який використовує для пошуку мінімально комбіновану стратегію – лінійну апроксимацію та градієнтний спуск. Застосування алгоритму Левенберга – Марквардта (3.10), де коригування визначається таким чином [66]:

$$\Delta w_j = (J^T J + \mu E)^{-1} J^T e_j. \quad (3.10)$$

В останньому виразі  $J$  — матриці Якобі вагових коефіцієнтів, обчислених у точці  $w$ . Ці матриці передбачають подвійне диференціювання функції  $e(w)$ . Уведення в ідентичної матриці  $E$  з параметром регуляризації  $\mu > 0$  дозволяє забезпечити вимогу додатної визначеності  $J^T J$ . Якщо  $\mu$  має велике значення, алгоритм має властивості встановлення градієнта, коли  $\mu$  мале, алгоритм діє подібно до методу Гауса – Ньютона [72]. Для спрощення обчислень під час обчислення матриці  $J$  пропонується (3.11) така обчислювальна процедура [66]:

$$J_j = J_{j-1} + \lambda \frac{\Delta e_j - J_{j-1} \Delta w_j}{|\Delta w_j|^2} \Delta w_j^T. \quad (3.11)$$

Ця процедура відрізняється від уведення коефіцієнта  $\lambda > 0$ , що забезпечило плавну збіжність обчислювального процесу. Припускаємо, що навчання досягло мети, коли похибка навчання не перевищує деякого малого значення  $\varepsilon > 0$ , що задовольняє конструктора системи (3.12) [66], тобто

$$|e(w)| \leq \varepsilon. \quad (3.12)$$

Алгоритм самоналаштування багат шарової нейронної мережі ВР вважається найбільш популярним з-поміж керованих алгоритмів. Далі подається програмна реалізація (у дод. Д) методу градієнтного пошуку на прикладі англійського 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].

Графічне зображення, еквівалентне йому, може бути отримане, оскільки елемент буквеного позначення подається перекресленим квадратом. Цей самий символ, спотворений шумом, показано на рис. 3.8.

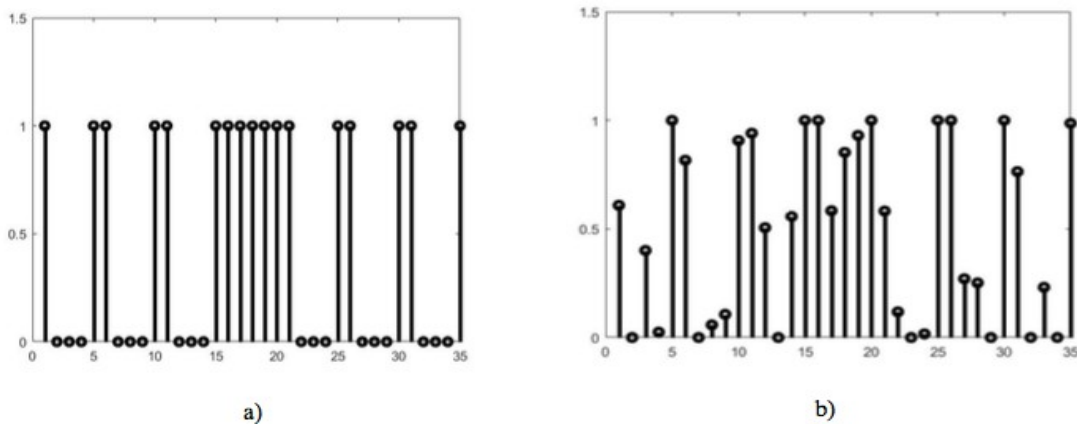


Рис 3.8. Літера Н подання символів без шуму (а) та із шумом (b) (його відносний рівень 0,75)

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 (3.5)–(3.7), (3.9). 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. Також встановлюється максимальна кількість епох (epoch) навчання та помилка, на якій закінчується навчання; ці значення вибираються рівними  $M = 555000$  та  $\epsilon = 3 \cdot 10^{-5}$  відповідно. Результати навчання подано на рис. 3.9. Використана функція мережевої підготовки дозволяє оцінити якість мережевою налаштування шляхом побудови лінії регресії, у якій коефіцієнт пропорційності дозволяє визначити ступінь кореляції між вхідними та вихідними даними.

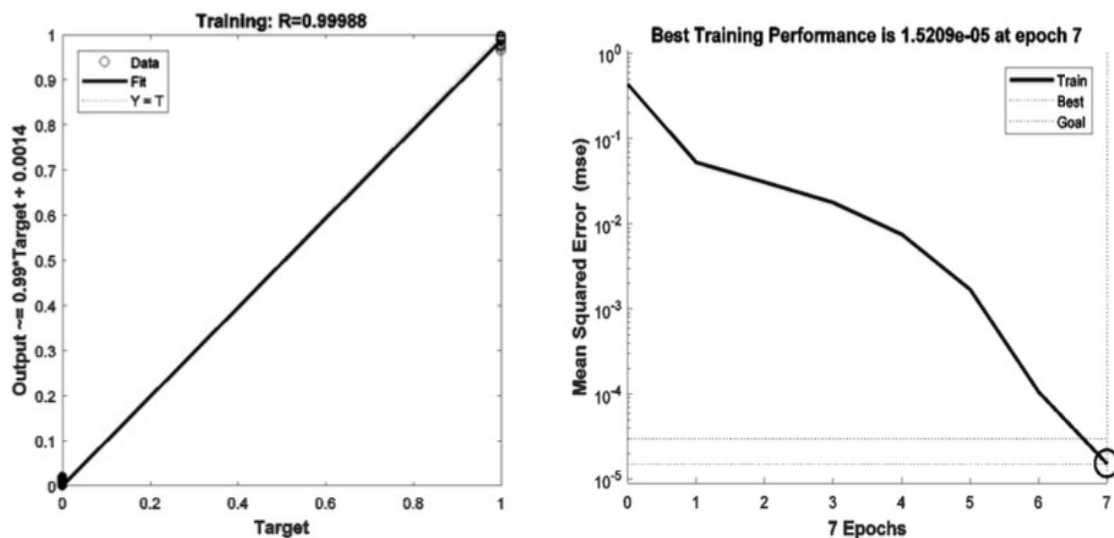


Рис. 3.9. Лінія регресії та помилка навчання.

У розглянутому випадку наявний високий ступінь кореляції між вхідними та вихідними даними,  $R = 0,999$ . Навчання в цьому прикладі закінчується

помилкою  $1,52 \cdot 10^{-5}$ , що пояснюється складністю вихідних даних. Для навчання знадобилося лише 8 епох (рис. 3.9).

Розглянемо також приклад розпізнавання фрази за налаштованою мережею. Як посилання використовується фраза «ТРИВОГА», яка подається в графічному вікні для відображення інформації послідовністю символів (рис.3.10)*а*. Ту саму фразу, спотворену шумом, показано (рис.3.10*б*), а неправильне розпізнавання – на рис.3.10 *в*.

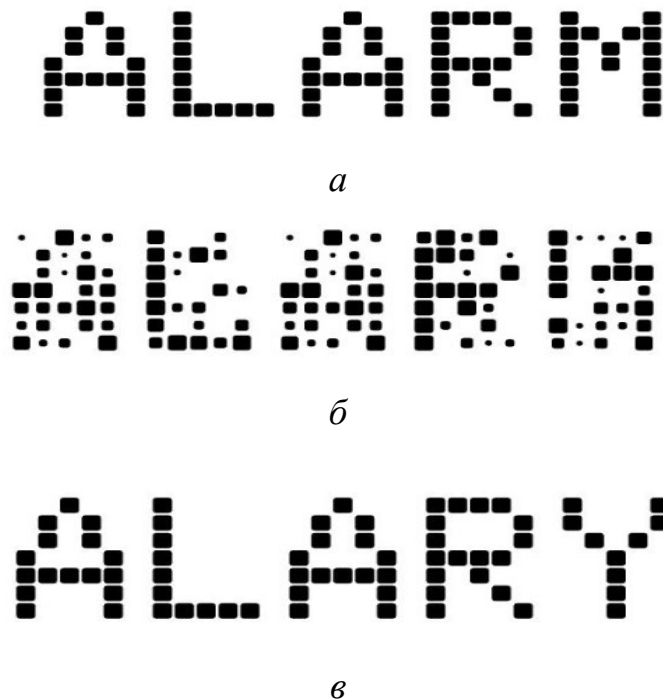


Рис. 3.10. Довідкова фраза для розпізнавання налаштованою мережею (*а*), фраза, спотворена рівнем шуму 0,5 (*б*) та фраза, розпізнавання з помилками (*в*).

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.3.1–3.3, 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 3.1. 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 3.2. 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 3.3. 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. Насправді це ітеративний метод градієнтного пошуку найкращих параметрів у даних умовах, що характеризується простотою класифікаційного завдання з точки зору «вхід–вихід» та надійністю роботи. Усі нейрони цієї мережі нелінійні завдяки використанню нелінійної функції активації. У роботі подано дослідження 2-, 3- та 4-шарових мереж за наявності



завад. Високу збіжність отримано завдяки використанню нової ітераційної процедури обчислення матриці Якобі. Незважаючи на високий ступінь відповідності вхідних даних вихідним даним, установленим завдяки функції регресії, результат навчання може виявитись неправильним через перекваліфікацію системи через прийнятий низький рівень помилок навчання.

Стисло розглянемо метод завадостійкого кодування у цифрових системах зв'язку та радіомережах, що знаходять застосування в інформаційній технології дисертаційної роботи 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. Імовірність спотворення біта в потоці даних, що передаються на рівні фізичного каналу, становить в межах  $10^{-2}$ - $10^{-6}$ . Для запобігання помилкам, відомо багато різних методів. Одним з ефективних засобів захисту інформації від помилок у цифрових системах зв'язку та радіомережах є завадостійке кодування інформації. Тему завадостійкого кодування інформації досить повно висвітлено в науково-технічних публікаціях; так у працях [67–69] розглядаються методи захисту від помилок, вживані в різних протоколах сучасних телекомунікаційних мереж. Значне збільшення інформаційних потоків, що циркулюють у радіомережах, ускладнює процеси, пов'язані з проміжним обробленням даних і становить особливо жорсткі вимоги до забезпечення високої завадостійкості інформації, що приймається. Множину методів захисту від помилок можна розділити на дві групи: методи, що не використовують зворотний зв'язок, і методи що використовують його. У першому випадку на стороні на передавальному боці дані кодуються одним з відомих кодів з виправленням помилок. На приймальному боці відповідно здійснюється декодування інформації, що приймається, і виправлення знайдених помилок. Можливість виправляти коду залежить від кількості надмірних бітів, що генеруються кодером. У системах зі зворотним зв'язком застосовуються процедури виявлення помилок і перезапиту, названі вирішальним зворотним

зв'язком або виявленням помилок з автоматичним запитом повторення (ARQ – Automatic Repeat Request). У цьому випадку код застосовується тільки в режимі виявлення помилок, що дозволяє досягти дуже низької імовірності не знайденої помилки ( $10^{-6}$ – $10^{-12}$ ) за незначного рівня надмірності, що вводиться. Іноді також застосовується комбінація двох розглянутих підходів, яка полягає в реалізації на передавальному боці спочатку кодування з виявленням помилок, а потім кодування кодом з виправленням помилок. Такі методи гібридного ARQ особливо ефективні у разі передавання даних по каналах дуже низької якості. Методи виявлення помилок з повторними передаванням непридатні для передавання відео і захисту від помилок інформації, що зберігається на жорстких носіях. У цих випадках ефективним є застосування завадостійких кодів з виправленням помилок. За низького енергетичного відношення сигнал/шум (1–3 дБ) доцільне застосування турбокодів, які дозволяють забезпечити високу ефективність кодування у разі незначної складності реалізації декодування пристроїв. Турбокод є паралельним каскадним кодом, утвореним двома або більше установлювальними кодами [70]. Схему турбокодера з двома кодерами зі швидкістю кодування  $R = 1/2$  зображено на рис. 3.11.

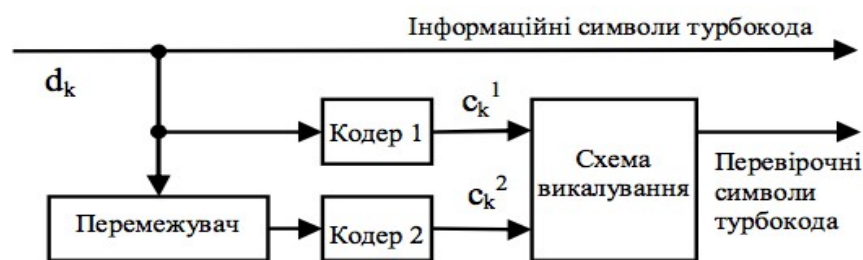


Рис. 3.11. Схема турбокодера [71]

Проте характерним недоліком турбокодів є зменшення ефективності кодування зі збільшенням енергетичного відношення сигнал/шум, що не дозволяє забезпечити  $P_{\text{пом}} < 10^{-6}$  за прийнятної складності декодування. Усунення цього недоліку можливе шляхом використання турбокодів сумісно з

кодами Ріда-Соломона в послідовних каскадних кодових конструкціях [71].

Каскадну схему з двома рівнями кодування, де внутрішнім кодом є турбокод, а зовнішнім – код Ріда-Соломона, показано на рис. 3.12.

На вхід кодера коду Ріда-Соломона надходять  $m$ -бітові символи. Кодове слово зовнішнього коду складається з  $n_1$   $m$ -бітових символів, причому  $k_1$  з них є інформаційними.

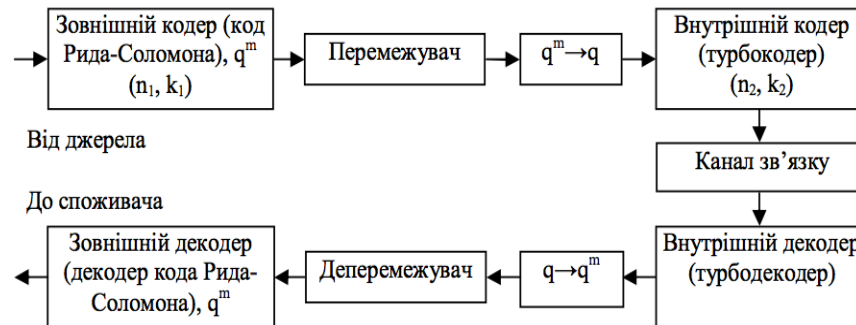


Рис. 3.12. Каскадна схема кодування [71]

Далі  $n_1$  символів, що виходять з кодера зовнішнього коду, після перемеження і відображення у двійкову послідовність завдовжки  $mn_1$ , кодуються кодером внутрішнього коду. При цьому до блока з  $mn_1$  двійкових символів додається  $n_2k_2$  перевіркових двійкових символів. Швидкість каскадного коду (3.13)

$$R^{TK+PC} = R^{PC} \times R^{TK}, \text{ де } R^{PC} = k_1/n_1, R^{TK} = k_2/n_2. \quad (3.13)$$

Перемеження потрібно виконати так, щоб ніякі два двійкові символи на виході турбодекодера, що містяться на відстані менш як  $5(v+1)$ , де  $v$  – кількість елементів пам'яті турбокоду згорткових кодів, не належали до одного символу коду Ріда-Соломона. У разі виконання цієї умови можна вважати помилки на вході зовнішнього кодера незалежними. Найпростіше таке перемеження здійснити за допомогою блокового або згорткового перемеження [72]. Використання послідовних каскадних конструкцій завадостійкого кодування для захисту від помилок та завад є ефективною технологією в сучасних самоналагоджувальних радіомережах [73].

На рис. 3.13 представлена взаємодія технологій маршрутизації та навчання при забезпеченні абонентів радіомережі. 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.

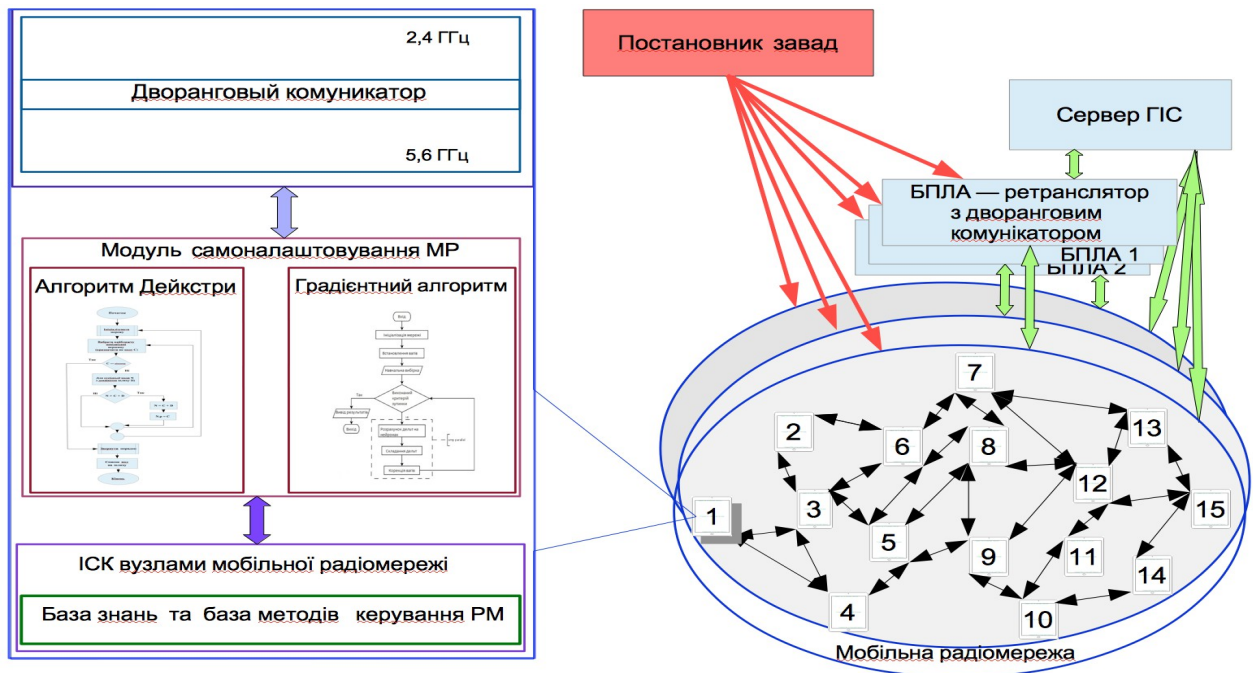


Рис. 3.13. Структура взаємодії технологій радіомережі з навчанням

У розрізі виконання НДР шифру «Розвиток–» [74–76] проведено дослідження статистичних моделей сигналів і завдань як просторово-часових польових структур, а також дослідження у галузі статистичного синтезу оптимальних просторово-часових фільтрів та аналізу просторово-тимчасових фільтрів. У праці [77] здобувачем у співавторстві наведено результати моделювання, проектування, експериментальних досліджень та випробувань фільтрів пропускних смуг з надвисокою крутістю схилів амплітудно-частотної характеристики в широкому спектрі частот дециметрового діапазону з використанням методу низькочастотних прототипів фільтрів. Можливість реалізації створених фільтрів з надвисокою крутістю схилів амплітудно-

частотної характеристики і їх подальше впровадження в мережах стільникового зв'язку та інших радіомережах є фактором, який суттєво впливає на ефективність використання радіочастотного ресурсу.

Як доводять автори [78], аналіз застосування засобів радіоелектронної боротьби, що використовуються збройними силами РФ під час проведення антитерористичної операції показує, що найбільш ефективними для перехоплення БПЛА є такі засоби радіоелектронної боротьби збройних сил РФ: комплекси «Шиповник Аеро» та «Красуха-4». Комплекс «Шиповник Аеро» являє собою багатоцільовий комплекс, який, дозволяє захопити БПЛА, навіть не знаючи шифрів та кодів каналу керування. Апаратна частина комплексу орієнтована на боротьбу з БПЛА, крім того, дозволено здійснювати радіоелектронне подавлення пунктів управління, мережі стільникового зв'язку та мережі широкосмугового зв'язку стандартів Wi-Fi, WiMax і DECT-мереж. Зазначений комплекс використовує імітаційні завади. Ключовою особливістю зазначеного комплексу є те, що він не використовує загороджувальних шумових завад (шумових завад у частині смуги), що орієнтовані на перевантаження приймача, а орієнтовані на помилку декодера. Станція «Красуха-4» призначені для прикриття військ на великих територіях від радіолокаційного визначення, а також протидії БПЛА. [78].

Для підвищення завадозахищеності каналів керування та передавання даних БПЛА, а також систем радіомереж необхідно використовувати розширення спектра за допомогою технології розширення кодових послідовностей, основними принципами якої є розширення спектра в поєднанні з кодовим розділенням фізичних каналів шляхом використання псевдовипадкових послідовностей. Як приклад можуть бути застосовані: двійкові послідовності Уолша, послідовності Шапіро–Рудіна, коди Баркера, коди Голда,  $M$ -послідовності, послідовності Адамара та багатофазні послідовності Френка та Задова-Чу, послідовності Мілевського, послідовності Голя [78].

### Висновки за розділом 3

1. Удосконалено перспективну архітектуру мобільної радіомережі з елементами мультирангової системи комунікації. Під час роботи в умовах активних завад така архітектура дозволяє переводити всю радіомережу на іншу смугу частот. У загальноприйнятій еталонній моделі ІСК вузлом мобільної радіомережі вводиться підсистема вибору рангу радіомережі. Алгоритм функціонування цієї підсистеми складається з таких етапів:

- підсистеми контролю, збирання, оброблення та зберігання даних випадків, за яких вузол перевантажується сигналом активної завади;
- аналізування показників функціонування вузла та мобільної радіомережі;
- виконання переходу вузла і всієї радіомережі на інший ранг (смугу частот), якщо певні показники функціонування мережі не задовольняють вимоги функціонування вузла і мобільного радіомережі.

2. 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 (вузлів) радіомережі в русі і відображає зміни в системі ГІС.

3. У запропонованій технології підтримання надійного зв'язку в умовах впливу організованих і ненавмисних завад, а також забезпечення багатовузлового доступу для роботи в пакетних радіомережах, реалізовано з використанням складних і шумоподібних сигналів структури OFDM. Це дозволило підвищити завадозахищеність, прихованість і безпеку роботи радіомережі. Використання послідовних каскадних конструкцій завадостійкого кодування для захисту від помилок та завад є ефективною технологією в запропонованій технології самоналагоджувальній радіомережі.

4. Досвід, здобутий під час проведення антитерористичної операції

показує, що для підвищення завадозахищеності каналів керування та передавання даних БПЛА, а також мобільних радіомереж, необхідно використовувати розширення спектра за допомогою технології розширювальних кодових послідовностей, основними принципами якої є розширення спектра в поєднанні з кодовим розділенням фізичних каналів шляхом використання псевдовипадкових послідовностей.

5. Запропоновано новий метод самоналаштування радіомережі на основі градієнтного підходу, що відрізняється від відомих інтеграцією градієнтного алгоритму налаштування ваги сусідніх вузлів і пошуку найкоротшого маршруту в мережі, що зазнає впливу завад.

Список використаних джерел у цьому розділі наведено у повному списку використаних джерел під номерами [51–78].

Основні наукові результати, одержані у цьому розділі, відображені у опублікованих статтях [56, 57, 72, 73, 76, 79] і тезах доповідей [93].

## Розділ 4

# МОДЕЛЮВАННЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ РАДІОМЕРЕЖІ

### 4.1. Моделювання зміни топології радіомережі

В останні роки додатковий імпульс розвитку теорії графів надали дослідження в галузі штучного інтелекту і оброблення природної мови. Часто використовуються аналітичні методи розрахунку інформаційних мереж, які основані на теорії систем масового обслуговування (побудовані на мережах Дж. Джексона) і апроксимації незалежності Л. Клейнрока, спочатку позбавлені інформації про топології та структури мережі й особливо радіомережі [79,80]. Тому радіомережі зі складними структурами досліджуються тільки імітаційними моделями. Математичні моделі таких інформаційних мереж не передбачають у формулі поведінки їх структурну (топологічну) організацію, яка істотно впливає на мережеві інформаційні характеристики. Методи аналізу і синтезу радіомереж повинні ґрунтуватися на єдності топології мережі та процесів, які перебігають в ній. У моделях мобільних цифрових радіомереж сьогодні застосовуються випадкові топології, у той час, як їх реальне функціонування не передбачає випадковості структурних елементів в інтервалі розгляду. Для побудови високомобільних радіомереж, особливо військових тактичного рівня, потрібно застосовувати детермінований підхід до формування їх топології з урахуванням мобільності та високої зв'язності. У численних опублікованих працях, для аналізу інформаційних і електричних мереж автори використовують математичний апарат тензорної методології, а з метою врахування динаміки потоків і їх взаємного інформаційного впливу – тензорний аналіз [81–87]. Зміна стану мережі за тензорною методологією розглядається як перетворення в системі координат. У визначенні значень параметрів мережі вагому роль відіграє тензор перетворення і зміна його



компонентів, які відповідають за зміни системи координат та які безпосередньо залежать від топології. Урахування просторового фактора в мобільній радіомережі відіграє ключову роль для забезпечення працездатності радіомережі як системи. У вирішенні завдання множинного доступу має передбачатися просторовий фактор, особливо за слабкої зв'язності мережі.

Варіант матриці для схеми радіомережі у вигляді графу складається з п'яти вузлів і десяти ребер (рис. 4.1).

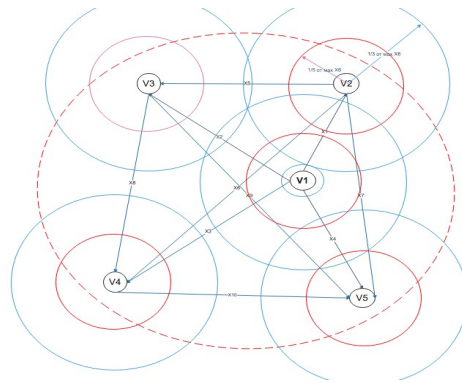


Рис. 4.1 Схема радіомережі у вигляді графу з п'яти вузлів і десяти ребер

Традиційно властивості графу описуються матрицею інцидентності  $G$ . Матриця  $GG^T$  є більш інформативною, оскільки, елементи на її головній діагоналі відповідають кількості маршрутів передавання даних (ребер), що виходять з тієї чи іншої вершини - вузла мережі. Елементи в рядках і стовпцях поза головною діагоналлю матриці  $GG^T$  указують на наявність загальних ребер у відповідній парі вершин (табл. 4.1).

Таблиця 4.1

Вершини	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_4$	$V_5$
$V_1$	4	1	1	1	1
$V_2$	1	4	1	1	1
$V_3$	1	1	4	1	1
$V_4$	1	1	1	4	1
$V_5$	1	1	1	1	4

Топологія - це властивості просторів, таких як зв'язність, орієнтовність,

компактність, які залишаються незмінними за безперервних деформацій. Керування топологією мобільної цифрової радіомережі засноване на оцінці її якості за ступенем зміни структурних характеристик і впливу елементів (вузлів комутації та каналів зв'язку) на деформацію структури. Перше передбачає дослідження вже сформованих структур, друге - можливість розроблення алгоритмів структурної стійкості і тому є об'єктом подальшого розгляду. Формування топологій цифрових радіомереж передбачає використання евристичних підходів, в основу яких покладено найбільш розроблені: увігнутий метод усунення ребер [80] і метод насиченого перетину [80,88–90]. Завдання оптимізації структури передбачає її покрокову зміну шляхом видалення або заміни недовантажених ребер під час виконання обмеження на зв'язність та діаметр [90].

Топологія радіомережі в динаміці погіршує характеристики мережі. Приклад результату передавання інформаційних пакетів у тактичних радіомережах з множинним доступом та контролем опорній [91] показує, що передавання інформації у відсотках від пропускну здатності для багатопротічної радіомережі знижується від 60% для статичної топології до 25–30% для динамічної. Динаміка топології погіршує ефективність передавання інформації в мережі. Ситуація ускладнюється випадковістю топології мобільної радіомережі, тому для поліпшення доставлення інформаційних пакетів зв'язність мережі з випадковою структурою повинна бути значно більшою (у два і більше разів), ніж для детермінованої або стаціонарної [92]. Згідно з [92], найбільшу інформаційну ефективність мають мережі зв'язку, кількість сусідніх вузлів у яких для кожного вузла за випадкової топології становить шість – вісім, а за детермінованих – три. З метою вирішення топологічного завдання далі в роботі пропонується застосувати такий підхід: сформувати надлишкову детерміновану структуру для мобільного радіомережі таким чином, щоб використовувати наявну надмірність (наприклад, шість – вісім замість трьох сусідів) для посилення чутливості цієї структури через будь-які

руйнівні фактори.

За однакової кількості вузлів умовного графу кількість варіантів їх переставок усіма можливими способами надзвичайно велика і в цьому виникає ще одна складність аналізу динаміки топології радіомережі. Утворені комбінації називаються перестановками (4.1), а їх кількість дорівнює

$$P_n = n! = 1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot \dots \cdot (n-1) \cdot n \quad (4.1)$$

Символ  $n!$  називається факторіалом і означає він утворення усіх цілих чисел від 1 до  $n$ . Так, максимальна кількість перестановок вузлів графу за динамічної топології радіомережі буде мати таку кількість комбінацій:

- якщо 5 вузлів  $P_5 = 5! = 1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 5 = 120$ ;
- якщо 10 вузлів  $P_{10} = 10! = 1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4 \cdot \dots \cdot 9 \cdot 10 = 3\,628\,800$ ;

Уявімо мобільну радіомережу у вигляді графу, який складається із сукупності вузлів комутації та каналів зв'язку. Канали зв'язку (ребра графу) характеризуються пропускними здатностями радіомережі, а вузли комутації (вершини графу) - станами активності комунікаторів. Вирішення завдання ефективного розподілу потоків інформації в мобільній радіомережі поряд з алгоритмами маршрутизації істотно залежить від топології мережі. Відомі аналітичні методи розподілу трафіку радіомережі, засновані на використанні теорії графів і, зокрема, на використанні алгоритмів визначення найкоротших шляхів на графі, таких як Беллмана–Форда, Дійкстра або Флойда–Уоршела [93]. Але цей підхід не враховує процеси, що перебігають у самій структурі топології радіомережі. За такого підходу до вирішення мережевого завдання основним використовуваним математичним поняттям є граф (або одновимірний клітинний простір у сенсі топології).

Завадостійкість радіомережі як системи – це здатність системи в цілому виконувати свої функції передавання–приймання інформації без спотворень від впливу активних або наявності пасивних завод. Твердження у праці [96], що кількість сусідніх вузлів, у яких для кожного вузла за випадкової топології

потрібно становить шість – вісім, справджується для радіомереж з вузькосмуговими сигналами (КХ, УКХ діапазонів). Для підтримання високого рівня завадостійкості радіомережі з мережевими комунікаторами з OFDM сигналом достатніми є умови, за яких будь-який комунікатор (вузол мережі  $V$ ) має з іншими комунікаторами (вузлами) мінімум три і більше маршрутів (ребра  $X$ ) передавання даних. Високий рівень можливих перестановок вузлів умовного графу в мобільній радіомережі не є критичним для аналізу завадостійкості з урахуванням топологічної мінливості структури мережі. Більш критичним для завадостійкості радіомережі в цілому і стійкості гарантованого передавання даних є просторове розширення самої топології, відносно до якої вузли віддаляються один від одного за фіксованої дальності зв'язку кожного вузла (мережевого комунікатора). Усі можливі на практиці фактори невизначеності поділяють на дві групи: ті, що «передбачаються, і ті, виявити які на апіорній стадії аналізування умов невизначеності нереально. Уведемо коефіцієнт топологічної невизначеності  $G_{\emptyset}$  радіомережі, який показує залежність співвідношення векторів між вузлами топології структури радіомережі, поданих у вигляді умовного графу, від радіуса зв'язку окремого вузла. Радіомережа у вигляді графу (рис. 4.1) (4.2)

$$G = (V, E), \quad (4.2)$$

де  $V$  – множина вершин (різне мережеве обладнання радіозв'язку);  $E$  – множина ребер графу (бездротові канали зв'язку). Коефіцієнт топологічної невизначеності  $G_{\emptyset}$  радіомережі (4.3) має вигляд:

$$G_{\emptyset} = 0,7 \sum E_{ij} > E_{r \min}, \quad (4.3)$$

де  $E_{ij}$  – ребро графу, як відстань між  $i$  та  $j$  вершинами графу;  $E_{r \min}$  – відстань, яка відповідає радіусу зв'язку окремого вузла.

Умови, за якими матриці перетинання вершин  $GG^T$  дорівнюють 0,7 максимально можливої кількості варіантів, є топологічною невизначеністю  $G_{\emptyset}$  радіомережі; за таких умов мережа має недостатню кількість варіантів

маршрутизації передавання даних між вузлами умовного графу.

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. В якості критерію завадостійкості мобільної радіомережі розглянуто максимальну дальність гарантованої передавання даних одного вузла мережі. Суть алгоритму полягає у створенні матриці інцидентності для різних конфігурацій (від кола через еліпс до форми лінії зіткнення) або однією конфігурації з різним числом вузлів – з початку розглянуто максимальну дальність гарантованого передавання даних одного вузла мережі, далі конфігурація розширюється в тричі та у п'ять разів. Відсоток гарантованої маршрутизації розраховується як співвідношення числа маршрутів радіомережі згідно з отриманими матрицями до максимального числа маршрутів матриці початкового рівня, коли всі вузли знаходяться в радіусі досяжності одного будь-якого вузла мережі (співвідношення записується у процентах). Зроблені оцінки впливу стосуються виключно топології.

Запропоновано геоінформаційну технологію автоматизованого оброблення даних з графічним зображенням топології радіомережі за допомогою геоінформаційної системи ArcGIS-10, яка дозволяє оцінити стійкість мережевої структури в динамічній зміні та виявити межі стійкої зв'язності вузлів комутації радіомережі. Такий підхід є новою варіацією і розширює межі розв'язання задачі розподілу трафіку та завадостійкості радіомережі з урахуванням структури мережевої топології.

#### **4.2 Аналіз завадостійкості мобільної радіомережі залежно від топології (конфігурації) на місцевості**

Розглянемо варіант самоналагоджувальної мобільної радіомережі тактичного рівня, абоненти (вузли умовного графу) якої взаємодіють між собою без функції ретранслятора (крім абонента  $V_1$ , який оснащений двохранговим комунікатором або радіомодемом) з кількістю абонентів мобільної групи десять.

Завдання – дослідити стійкість такої групи радіомережі через аналіз максимально можливих варіантів маршрутизації без режиму ретрансляції між абонентами (вузлами) радіомережі, застосувавши метод торцевого множення матриць і проаналізувавши топології графу однорангової мережі в теорії зв'язку. Прийнятним рівнем завадостійкості мобільної групи радіомережі вважатимемо умову, за якої комунікатор (вузол мережі  $V$ ) має з іншими комунікаторами (вузлами) мінімум три і більше маршрутів (ребра  $X$ ). Кількість стовпців має відповідати максимальній кількості ребер в окремо взятому маршруті розглянутої мережі. У зазначеному фрагменті мережі кількість вершин – десять, вони, своєю чергою, з'єднані сорока п'ятьма ребрами.

Матриця інцидентності  $GG^T$  є більш інформативною, оскільки, елементи на її головній діагоналі відповідають кількості маршрутів передавання даних (ребер), що виходять з тієї чи іншої вершини – вузлів зв'язку мережі. У традиційній матриці суміжності таку інформацію можна отримати підсумовуванням елементів у стовпцях або множенням матриці праворуч на вектор одиниць. Елементи в рядках і стовпцях поза головною діагоналлю матриці  $GG^T$  указують на наявність загальних ребер у відповідній парі вершин.

Як критерій для аналізу завадостійкості мобільної радіомережі задамо максимальну дальність гарантованого передавання даних або пакетів кожного комунікатора (вузла мережі) без режиму ретрансляції, що дає можливість оцінити вплив виключно топології на завадостійкість радіомережі. Абоненти (вузли) мобільної радіомережі змінюють свою конфігурацію під час руху на місцевості в напрямку розширення і дальність зв'язку між окремими вузлами

зменшиться у три і п'ять разів. Проведемо аналіз зміни конфігурації радіомережі. Такі групи мають дуже динамічну топологію і можуть швидко змінювати конфігурацію, відповідно до поняття мобільної радіомережі з високою нестационарністю.

Аналіз топології радіомережі та візуалізацію результатів виконаємо за допомогою геоінформаційної системи ArcGIS10. Модуль ArcGIS Geostatistical Analyst забезпечує геостатистичний аналіз і моделювання просторових даних, включаючи надання інтерактивних графічних засобів підбору статистичних параметрів моделей просторових розподілів. Результати цього аналізу подано у вигляді рис. 4.2–4.4.

Конфігурація групи радіомережі набуває форми кола (рис. 4.2 та дод. Е).

Варіант 1, за якого максимальна дальність зв'язку між вузлами мережі відповідає дальності зв'язку окремого вузла.

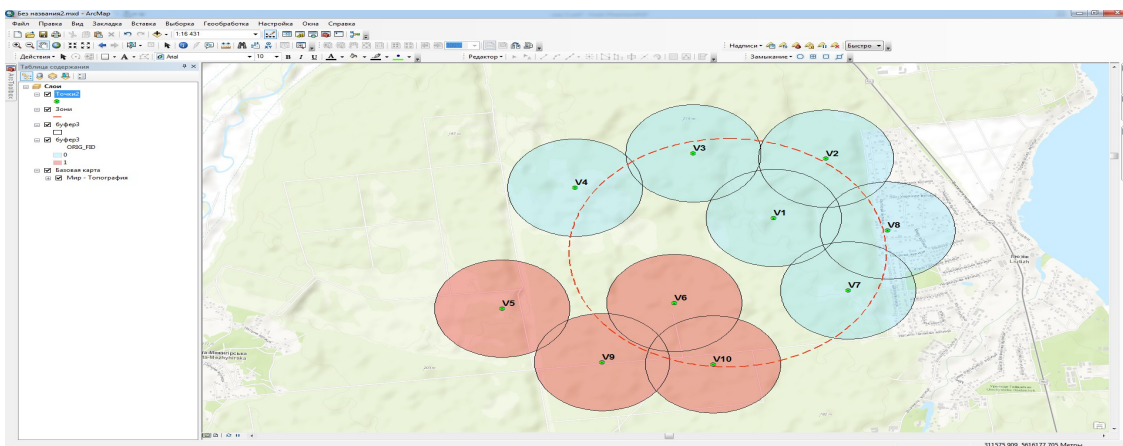
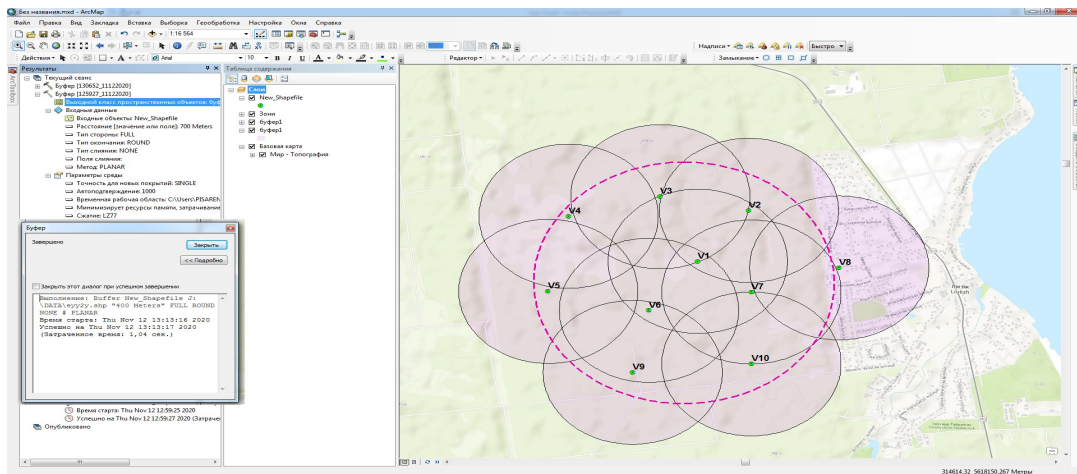


Рис. 4.2. Зміна топології радіомережі з 10 абонентів (вузлів умовного графу) з

## конфігурацією у формі кола

Матрицю інцидентності для такого варіанта подано у вигляді табл.4.2

Таблиця 4.2

Вершини	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_4$	$V_5$	$V_6$	$V_7$	$V_8$	$V_9$	$V_{10}$
$V_1$	<b>9</b>	1	1	1	1	1	1	1	1	1
$V_2$	1	<b>9</b>	1	1	1	1	1	1	1	1
$V_3$	1	1	<b>9</b>	1	1	1	1	1	1	1
$V_4$	1	1	1	<b>9</b>	1	1	1	1	1	1
$V_5$	1	1	1	1	<b>9</b>	1	1	1	1	1
$V_6$	1	1	1	1	1	<b>9</b>	1	1	1	1
$V_7$	1	1	1	1	1	1	<b>9</b>	1	1	1
$V_8$	1	1	1	1	1	1	1	<b>9</b>	1	1
$V_9$	1	1	1	1	1	1	1	1	<b>9</b>	1
$V_{10}$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	<b>9</b>

За такого варіанта група оснащена мережевими комунікаторами з OFDM сигналом без вбудованої функції ретрансляції буде впевнено забезпечена гарантованим зв'язком навіть в умовах застосування активних завад. За таких умов уся мережа має 90 варіантів маршрутизації передавання даних з 90 можливих (100%). Це ідеальний варіант, коли топологія, згідно з якою група переміщається на місцевості, наближається до кола.

Варіант 2, за якого дальність зв'язку мережі між окремими вузлами у три рази зменшиться (рис. 4.2). Матрицю інцидентності для такого варіанта представлена в табл. 4.3.

Таблиця 4.3

Вершини	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_4$	$V_5$	$V_6$	$V_7$	$V_8$	$V_9$	$V_{10}$
$V_1$	<b>8</b>	1	1	0	0	1	1	1	1	1
$V_2$	1	<b>5</b>	1	0	0	1	1	1	0	0
$V_3$	1	1	<b>6</b>	1	1	1	1	0	0	0
$V_4$	1	0	1	<b>5</b>	1	1	0	0	1	0
$V_5$	0	0	1	1	<b>4</b>	1	0	0	1	0
$V_6$	1	1	1	1	1	<b>9</b>	1	1	1	1
$V_7$	1	1	1	0	1	1	<b>8</b>	1	1	1
$V_8$	1	1	0	0	0	1	1	<b>5</b>	0	1
$V_9$	1	0	0	1	1	1	1	0	<b>6</b>	1



$V_{10}$	1	0	0	0	0	1	1	1	1	<b>5</b>
----------	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----------

За таких умов вся мережа має 61 варіант маршрутизації передавання даних з 90 можливих (68%). За відсутності впливу активних завад, зв'язок між ними можлива для всіх абонентів групи.

Варіант 3, при якому дальність зв'язку мережі між окремими вузлами зменшиться в п'ять разів. Матрицю інцидентності для такого варіанта подано у вигляді табл. 4.4

Таблиця 4.4

Вершини	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_4$	$V_5$	$V_6$	$V_7$	$V_8$	$V_9$	$V_{10}$
$V_1$	<b>5</b>	1	1	0	0	1	1	1	0	0
$V_2$	1	2	0	0	0	0	0	1	0	0
$V_3$	1	0	2	1	0	0	0	0	0	0
$V_4$	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0
$V_5$	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0
$V_6$	1	0	0	0	0	<b>4</b>	1	0	1	1
$V_7$	1	0	0	0	0	1	<b>4</b>	1	0	1
$V_8$	1	1	0	0	0	0	1	<b>3</b>	0	0
$V_9$	0	0	0	0	1	1	0	0	<b>3</b>	1
$V_{10}$	0	0	0	0	0	1	1	0	1	<b>3</b>

В умовах застосування активних завад гарантований зв'язок можуть забезпечити шість з десяти вузлів радіомережі. Уся радіомережа має 22 варіанти маршрутизації з 90 можливих (46%). Розосередження групи на місцевості з мінімальною відстанню гарантований зв'язок між вузлами мережі, в умовах активних завад, може бути забезпечений фрагментарно, втрачається управління групою, яка розпадається на дві частини – виділено вузли мережі, з якими втрачено зв'язок (див. рис. 4.2). Результати аналізу узагальнено у вигляді графіка (рис. 4.5).

Відповідно до заданих вище змінимо топологію однорангової радіомережі на конфігурацію у формі **еліпса** (рис. 4.3). Проаналізуємо як зміниться стійкість радіомережі порівняно з варіантом, коли конфігурація наближена до форми кола. Варіант, за якого максимальна дальність зв'язку між вузлами мережі

(ребро  $X_{12}$  – дод. Е) відповідає дальності зв'язку окремого вузла, розглядати не будемо. При цьому дальність зв'язку між двома найбільш віддаленими вузлами не перевищує радіуса радіозв'язку вузла і всі інші вузли будуть мати максимальну кількість маршрутів між ними – дев'ять.

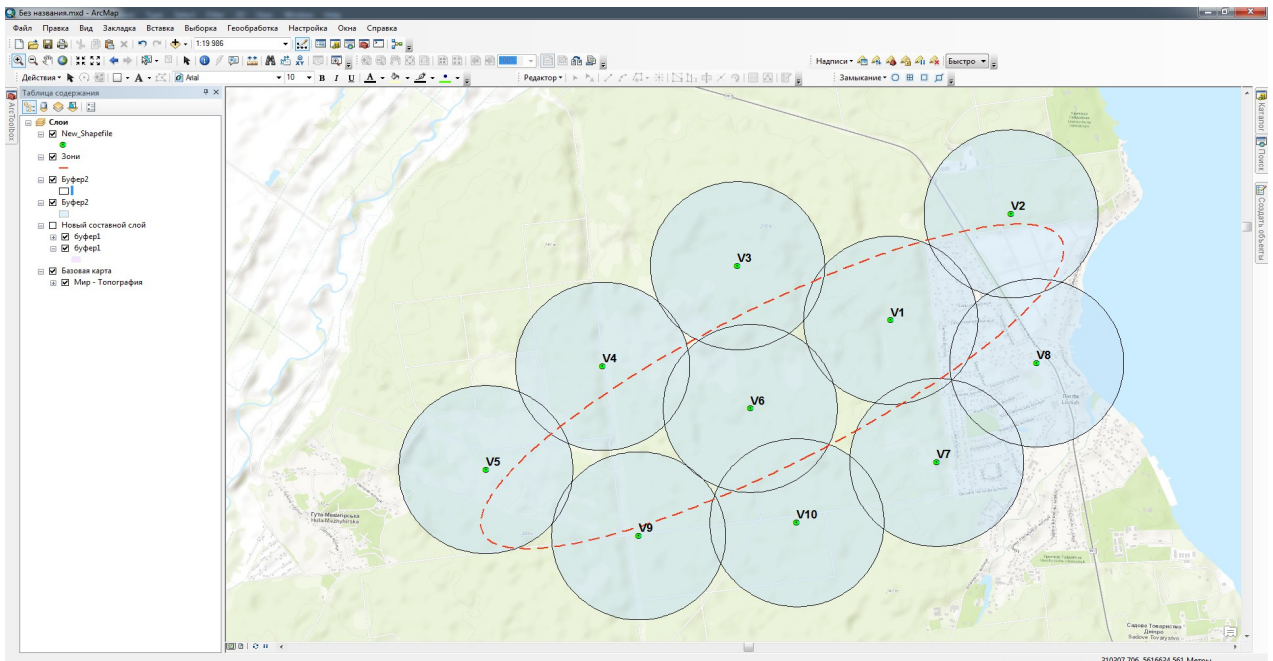
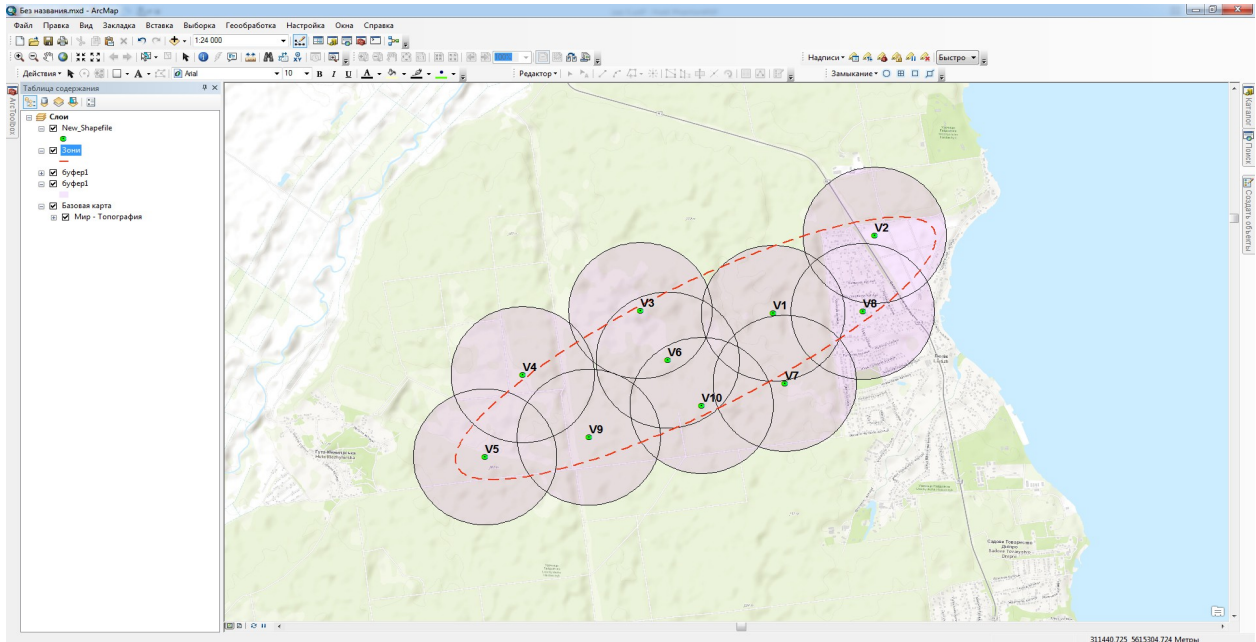


Рис. 4.3. Зміна топології радіомережі з 10 абонентів (вузлів умовного графу) з конфігурацією у формі еліпса

Стійкість такої радіомережі внаслідок впливу активних завад будь-якої інтенсивності буде високою.

Варіант 4, за якого дальність зв'язку мережі між окремими вузлами у три рази зменшиться. Матрицю інцидентності для такого варіанта подано у вигляді табл. 4.5

Таблиця 4.5

Вершини	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_4$	$V_5$	$V_6$	$V_7$	$V_8$	$V_9$	$V_{10}$
$V_1$	<b>9</b>	1	1	1	1	1	1	1	1	1
$V_2$	1	<b>6</b>	1	0	0	1	1	1	0	1
$V_3$	1	1	<b>9</b>	1	1	1	1	1	1	1
$V_4$	1	0	1	<b>8</b>	1	1	1	1	1	1
$V_5$	1	0	1	1	<b>6</b>	1	0	0	1	1
$V_6$	1	1	1	1	1	<b>9</b>	1	1	1	1
$V_7$	1	1	1	1	0	1	<b>6</b>	1	1	1
$V_8$	1	1	1	1	0	1	1	<b>8</b>	1	1
$V_9$	1	0	1	1	1	1	1	1	<b>8</b>	1
$V_{10}$	1	0	1	1	1	1	1	1	1	<b>8</b>

Відповідно до варіанта 4 в умовах застосування активних завад гарантований зв'язок можуть забезпечити всі десять вузлів. Уся радіомережа має 77 варіантів маршрутизації передавання даних з 90 можливих (86%). Порівняно з конфігурацією, наближеною до форми кола, стійкість радіомережі в цілому покращилася на 18% через збільшення щільності абонентів (вузлів) уздовж умовної лінії.

Варіант 5, за якого дальність зв'язку мережі між окремими вузлами мережі в п'ять разів зменшиться. Матрицю інцидентності для такого варіанта подано у вигляді табл. 4.6

Таблиця 4.6

Вершини	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_4$	$V_5$	$V_6$	$V_7$	$V_8$	$V_9$	$V_{10}$
$V_1$	<b>6</b>	1	1	0	0	1	1	1	0	1
$V_2$	1	<b>3</b>	0	0	0	0	1	1	0	0
$V_3$	1	0	<b>7</b>	1	0	1	1	1	1	1
$V_4$	0	0	1	<b>5</b>	1	1	0	0	1	1
$V_5$	0	0	0	1	<b>2</b>	0	0	0	1	0

$V_6$	1	0	1	1	0	<b>6</b>	1	0	1	1
$V_7$	1	1	1	0	0	1	<b>6</b>	1	0	1
$V_8$	1	1	1	0	0	0	1	<b>5</b>	0	1
$V_9$	0	0	1	1	1	1	0	0	<b>5</b>	1
$V_{10}$	1	0	1	1	0	1	1	1	1	<b>7</b>

Відповідно до варіанта 5 в умовах застосування активних завад гарантований зв'язок можуть забезпечити дев'ять з десяти вузлів. У таких умовах вся мережа має 50 варіантів маршрутизації передавання даних з 90 можливих (56%). При цьому зв'язок можливий для дев'яти абонентів групи (з десяти). Порівняно з варіантом конфігурації, наближеною до кола, стійкість мережі в цілому покращилася на 10% через збільшення щільності абонентів (вузлів) уздовж умовної лінії.

Варіант 6, за якого дальність зв'язку мережі між окремими вузлами мережі у дванадцять разів зменшиться. Матрицю інцидентності для такого варіанта подано у вигляді табл. 4.7

Таблиця 4.7

Вершини	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_4$	$V_5$	$V_6$	$V_7$	$V_8$	$V_9$	$V_{10}$
$V_1$	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0
$V_2$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$V_3$	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0
$V_4$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$V_5$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$V_6$	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0
$V_7$	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0
$V_8$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$V_9$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$V_{10}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Відповідно до варіанта 6 в умовах застосування активних завад гарантований зв'язок можуть забезпечити нуль з десяти вузлів. Уся радіомережа має чотири варіанти маршрутизації передавання даних з 90 можливих (близько 4%). У таких умовах розосередження групи на місцевості зв'язок між вузлами мережі неможливий і втрачається керування групою (або група розпадається на

кілька керованих підгруп). Результати аналізу узагальнено у вигляді графіка (рис. 4.5).

За заданих вище умо змінимо топологію самоналагоджувальної однорангової радіомережі тактичного рівня на конфігурацію у формі **лінії зіткнення з противником** (рис. 4.4). Такий варіант максимально наближений до ситуації в зоні проведення операції об'єднаних сил на сході України.

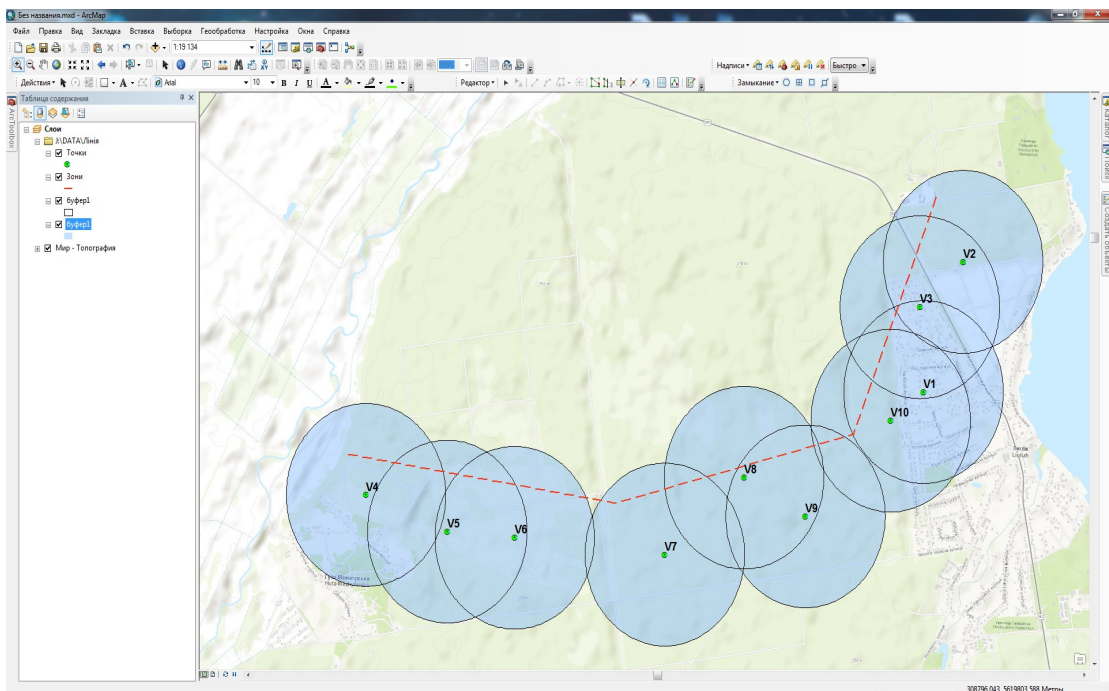
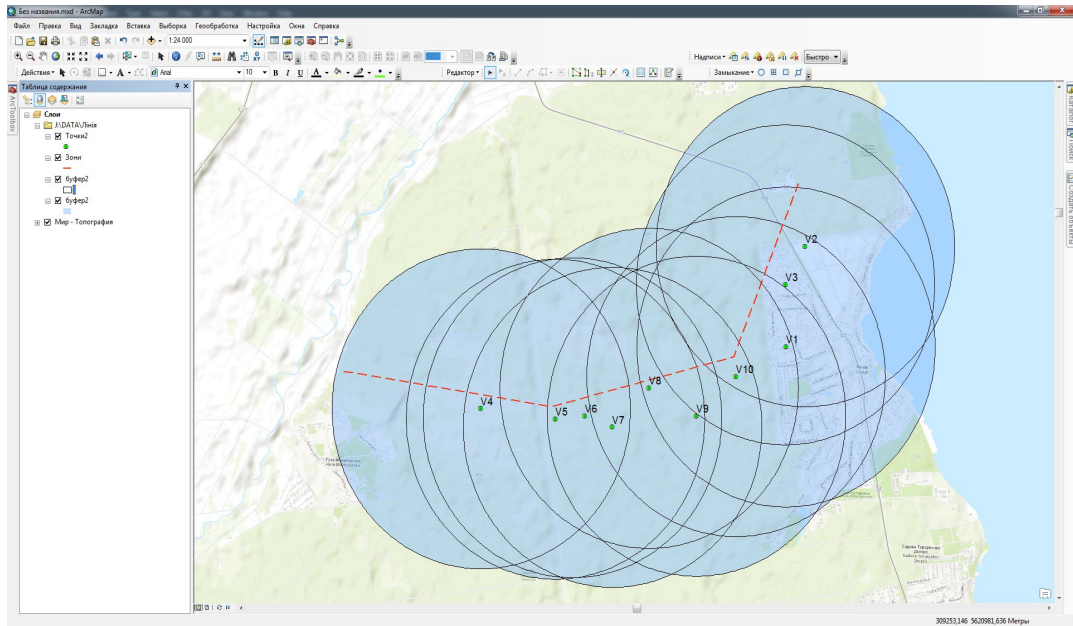


Рис. 4.4. Зміна топології радіомережі з 10 абонентів (вузлів умовного графу)  
з конфігурацією у формі лінії зіткнення

Уздовж лінії зіткнення з противником обладнано мережу опорних пунктів з'єднаних траншеями. Проаналізуємо як зміниться стійкість радіомережі порівняно з варіантами наближено до форми кола та до еліпсоїдної конфігурації. Варіант, за якого максимальна дальність зв'язку між найбільш віддаленими вузлами мережі (дод. Е) відповідає дальності зв'язку окремого вузла, розглядати не будемо, бо дальність зв'язку між іншими вузлами не перевищує номінальної дальності зв'язку окремого комунікатора і всі інші вузли матимуть максимальну кількість маршрутів між ними – дев'ять. Стійкість такої радіомережі внаслідок впливу активних завад будь-якої інтенсивності буде високою.

Варіант 7, за якого дальність зв'язку мережі між окремими вузлами у три рази зменшиться. Матрицю інцидентності для такого варіанта подано у вигляді табл. 4.8.

Таблиця 4.8

Вершини	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_4$	$V_5$	$V_6$	$V_7$	$V_8$	$V_9$	$V_{10}$
$V_1$	<b>8</b>	1	1	0	1	1	1	1	1	1
$V_2$	1	<b>7</b>	1	0	0	1	1	1	1	1
$V_3$	1	1	<b>8</b>	0	1	1	1	1	1	1
$V_4$	0	0	0	<b>6</b>	1	1	1	1	1	1
$V_5$	1	0	1	1	<b>8</b>	1	1	1	1	1
$V_6$	1	1	1	1	1	<b>9</b>	1	1	1	1
$V_7$	1	1	1	1	1	1	<b>9</b>	1	1	1
$V_8$	1	1	1	1	1	1	1	<b>9</b>	1	1
$V_9$	1	1	1	1	1	1	1	1	<b>9</b>	1
$V_{10}$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	<b>9</b>

Відповідно до варіанта 7 в умовах застосування активних завад гарантований зв'язок можуть забезпечити всі десять вузлів. У таких умовах вся мережа має 74 варіанти маршрутизації передавання даних з 90 можливих (82%). Завадостійкість мережі в цілому покращилася більше ніж на 14% порівняно з

варіантом конфігурації, наближеної до конфігурації кола і погіршилася на 4% порівняно з варіантом конфігурації наближеної до еліптичної форми.

Варіант 8, за якого дальність зв'язку мережі між окремими вузлами в п'ять разів зменшиться. Матрицю інцидентності для такого варіанта подано у вигляді табл. 4.9.

Таблиця 4.9

Вершини	V <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	V <sub>3</sub>	V <sub>4</sub>	V <sub>5</sub>	V <sub>6</sub>	V <sub>7</sub>	V <sub>8</sub>	V <sub>9</sub>	V <sub>10</sub>
V <sub>1</sub>	<b>6</b>	1	1	0	0	0	1	1	1	1
V <sub>2</sub>	1	<b>3</b>	1	0	0	0	0	0	0	1
V <sub>3</sub>	1	1	<b>5</b>	0	0	0	0	1	1	1
V <sub>4</sub>	0	0	0	2	1	1	0	0	0	0
V <sub>5</sub>	0	0	0	1	<b>4</b>	1	1	1	0	0
V <sub>6</sub>	0	0	0	1	1	<b>5</b>	1	1	1	0
V <sub>7</sub>	1	0	0	0	1	1	<b>6</b>	1	1	1
V <sub>8</sub>	1	0	1	0	1	1	1	<b>7</b>	1	1
V <sub>9</sub>	1	0	1	0	0	1	1	1	<b>3</b>	1
V <sub>10</sub>	1	1	1	0	0	0	1	1	1	<b>6</b>

Відповідно до варіанта 8 в умовах застосування активних завад гарантований зв'язок можуть забезпечити дев'ять з десяти вузлів. У таких умовах уся мережа має 45 варіантів маршрутизації передачі даних з 90 можливих (50%). За однакової дальності зв'язку між вузлами мережі стійкість мережі в цілому покращилася на 4% порівняно з варіантом конфігурації, наближеної до кола і зменшилася на 6% порівняно з варіантом, наближеним до еліптичної форми.

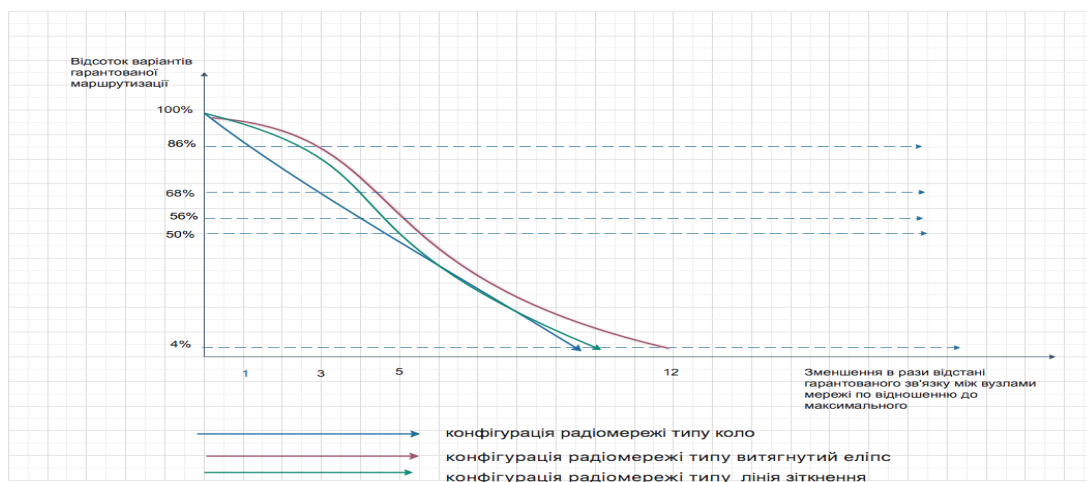


Рис. 4.5. Графік залежності варіантів маршрутизації від топології (конфігурації) мобільної радіомережі на місцевості

Результати узагальнено у вигляді графіка (рис. 4.5) – по вертикальній осі показано співвідношення гарантованої маршрутизації до максимально можливої кількості маршрутів у даній топології (у відсотках), по горизонтальній осі – значення зменшення радіуса гарантованого зв'язку між вузлами радіомережі відносно максимально можливого, за якого радіус дальності зв'язку дорівнює відстані між максимально віддаленими вузлами (коефіцієнт віддалення елементів топології радіомережі від умовного центра).

Найбільш завадостійкою є конфігурація радіомережі на місцевості у формі витягнутого еліпса. За конфігурації у вигляді витягнутої лінії стійкість радіомережі зменшується на 4–6% і залишається високою. Якщо конфігурація наближена до форми кола, стійкість радіомережі зменшується на 18–10% порівняно з конфігурацією у вигляді витягнутого еліпса і відсоток гарантованої маршрутизації зменшується до 50% за дальності зв'язку, еквівалентної 1/4 від максимальної відстані між вузлами мережевої топології (фактично діаметр кола). Усі розрахунки були виконані для мобільної радіомережі з 10 вузлами (радіомодемами або комунікаторами).

У разі зміни топології мобільної радіомережі на місцевості в конфігурації від кола до витягнутого еліпса і до витягнутої лінії зіткнення з однаковим параметром дальності зв'язку (співвідношення відстані між двома найбільшими віддаленими вузлами і відстанню між вузлами у три і п'ять разів меншими) стійкість радіомережі змінюється і має вигляд, графіка, показаного на (рис. 4.5).

#### 4.3. Аналіз завадостійкості мобільної радіомережі з конфігурацією кола на місцевості залежно від кількості вузлів

Проаналізуємо як зміниться стійкість мобільної однорангової радіомережі,



конфігурація якої на місцевості наближена до форми кола залежно від кількості абонентів (вузлів) від п'яти до двадцяти з дискретністю п'ять. Передбачається, що радіомережа функціонує без режиму ретрансляції. Варіанти, за яких максимальна дальність зв'язку між самими віддаленими вузлами радіомережі відповідає дальності зв'язку окремого вузла, розглядати не будемо, бо всі інші вузли будуть мати максимальну кількість маршрутів між ними. Стійкість такої мобільної радіомережі внаслідок впливу активних завад будь-якої інтенсивності буде незмінно високою. Абоненти (вузли) мобільної радіомережі змінюють свою конфігурацію під час руху на місцевості в напрямку розширення і дальність зв'язку між окремими вузлами зменшиться у три і п'ять разів. Проаналізуємо зміни конфігурації радіомережі.

Розглянемо стійкість мобільної тимчасової радіомережі, конфігурація якої на місцевості наближена до форми кола з **п'ятьма вузлами**; схему показано на рис. 4.6. та дод. Е).

Варіант 9, за якого дальність зв'язку мережі між окремими вузлами радіомережі в три рази зменшиться. Матрицю інцидентності для такого варіанта подано у вигляді табл. 4.10.

Таблиця 4.10

Вершини	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_4$	$V_5$
$V_1$	<b>3</b>	1	1	0	1
$V_2$	1	2	1	0	0
$V_3$	1	1	2	0	0
$V_4$	0	0	0	0	0
$V_5$	1	0	0	0	1

Відповідно до варіанта 9 в умовах застосування активних завад гарантований зв'язок можуть забезпечити один з п'яти вузлів. У таких умовах вся мережа має три варіанти маршрутизації передавання даних з 20 можливих (15%).

Варіант 10, за якого дальність зв'язку мережі між окремими вузлами мережі в п'ять разів зменшиться. Матрицю інцидентності для такого варіанта

подано у вигляді табл. 4.11.

Таблиця 4.11

Вершини	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_4$	$V_5$
$V_1$	0	0	0	0	0
$V_2$	0	0	0	0	0
$V_3$	0	0	0	0	0
$V_4$	0	0	0	0	0
$V_5$	0	0	0	0	0

Відповідно до варіанта 10 в умовах застосування активних завад гарантований зв'язок можуть забезпечити нуль з п'яти вузлів. У таких умовах вся мережа має не мати варіантів маршрутизації передавання даних з 10 можливих (0%).

Завадостійкість мобільної однорангової радіомережі, конфігурація якої на місцевості наближена до форми **кола з десятима вузлами**, як показано на (рис. 4.2. та дод. Е). Матриці інцидентності для такого варіанта подано у вигляді табл. 4.3 і 4.4. Розглянемо завадостійкість мобільної радіомережі, конфігурація якої на місцевості наближена до форми **кола з п'ятнадцятьма вузлами**, як показано на (рис. 4.7 та дод. Е).

Варіант 11, за якого дальність зв'язку мережі між окремими вузлами мережі в три рази зменшиться. Матрицю інцидентності для такого варіанта подано у вигляді табл. 4.12.

Таблиця 4.12

Вершини	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_4$	$V_5$	$V_6$	$V_7$	$V_8$	$V_9$	$V_{10}$	$V_{11}$	$V_{12}$	$V_{13}$	$V_{14}$	$V_{15}$
$V_1$	<b>12</b>	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1
$V_2$	1	<b>7</b>	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1
$V_3$	1	1	<b>9</b>	1	1	1	0	1	0	0	0	1	0	1	1
$V_4$	1	1	1	<b>9</b>	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0	1
$V_5$	1	0	1	1	<b>6</b>	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
$V_6$	1	0	1	1	1	<b>8</b>	1	1	1	1	0	0	0	0	0
$V_7$	0	0	0	1	1	1	<b>6</b>	1	1	1	0	0	0	0	0
$V_8$	1	1	1	1	1	1	1	<b>13</b>	1	1	1	1	1	0	1
$V_9$	0	0	0	0	0	1	1	1	<b>6</b>	1	1	1	0	0	0
$V_{10}$	1	0	0	0	0	1	1	1	1	<b>8</b>	1	1	1	0	0
$V_{11}$	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	<b>8</b>	1	1	1	1

$V_{12}$	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	<b>11</b>	1	1	1
$V_{13}$	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	<b>8</b>	1	1
$V_{14}$	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	<b>7</b>	1
$V_{15}$	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	<b>9</b>

Відповідно до варіанта 11 в умовах застосування активних завад гарантований зв'язок можуть забезпечити всі п'ятнадцять вузлів. У таких умовах вся мережа має 127 варіантів маршрутизації передавання даних з 210 можливих (60%).

Варіант 12, за якого дальність зв'язку мережі між окремими вузлами мережі в п'ять разів зменшиться. Матрицю інцидентності для такого варіанта подано у вигляді табл. 4.13.

Таблиця 4.13

Вершини	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_4$	$V_5$	$V_6$	$V_7$	$V_8$	$V_9$	$V_{10}$	$V_{11}$	$V_{12}$	$V_{13}$	$V_{14}$	$V_{15}$
$V_1$	<b>8</b>	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1
$V_2$	1	<b>4</b>	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
$V_3$	1	1	<b>3</b>	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$V_4$	1	0	1	<b>5</b>	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0
$V_5$	0	0	0	1	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$V_6$	0	0	0	1	1	<b>4</b>	1	1	0	0	0	0	0	0	0
$V_7$	0	0	0	0	0	1	<b>3</b>	1	1	0	0	0	0	0	0
$V_8$	1	0	0	1	0	1	1	<b>6</b>	1	1	0	0	0	0	0
$V_9$	0	0	0	0	0	0	1	1	<b>3</b>	1	0	0	0	0	0
$V_{10}$	0	0	0	0	0	0	0	1	1	<b>3</b>	1	0	0	0	0
$V_{11}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	<b>3</b>	1	1	0	0
$V_{12}$	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	<b>4</b>	1	1	0
$V_{13}$	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	<b>5</b>	1	1
$V_{14}$	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	<b>5</b>	1
$V_{15}$	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	<b>4</b>

Відповідно до варіанта 12 в умовах застосування активних завад гарантований зв'язок можуть забезпечити всі п'ятнадцять вузлів. У таких умовах вся мережа має 60 варіантів маршрутизації передавання даних з 210 можливих (29%).

Розглянемо стійкість мобільної однорангової радіомережі, конфігурація

якої на місцевості наближена до форми кола з двадцятьма вузлами (рис. 4.8 та дод. Е).

Варіант 13, за якого дальність зв'язку мережі між окремими вузлами мережі в три рази зменшиться. Матрицю інцидентності для такого варіанта подано у вигляді табл. 4.14.

Таблиця 4.14

Вершини	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_4$	$V_5$	$V_6$	$V_7$	$V_8$	$V_9$	$V_{10}$
$V_1$	<b>19</b>	1	1	1	1	1	1	1	1	1
$V_2$	1	<b>9</b>	1	1	0	0	0	0	0	0
$V_3$	1	1	<b>9</b>	1	1	1	0	1	0	0
$V_4$	1	1	1	<b>9</b>	1	1	1	1	0	0
$V_5$	1	0	1	1	<b>6</b>	1	1	1	0	0
$V_6$	1	0	1	1	1	<b>8</b>	1	1	1	1
$V_7$	1	0	0	1	1	1	<b>8</b>	1	1	1
$V_8$	1	0	1	1	1	1	1	<b>11</b>	1	1
$V_9$	1	0	0	0	0	1	1	1	<b>7</b>	1
$V_{10}$	1	0	0	0	0	1	1	1	1	<b>11</b>
$V_{11}$	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1
$V_{12}$	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1
$V_{13}$	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1
$V_{14}$	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
$V_{15}$	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1
$V_{16}$	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1
$V_{17}$	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
$V_{18}$	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
$V_{19}$	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
$V_{20}$	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0

Вершини	$V_{11}$	$V_{12}$	$V_{13}$	$V_{14}$	$V_{15}$	$V_{16}$	$V_{17}$	$V_{18}$	$V_{19}$	$V_{20}$
$V_1$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
$V_2$	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
$V_3$	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
$V_4$	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
$V_5$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$V_6$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$V_7$	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$V_8$	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
$V_9$	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
$V_{10}$	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0



$V_{19}$	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
$V_{20}$	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0

Вершини	$V_{11}$	$V_{12}$	$V_{13}$	$V_{14}$	$V_{15}$	$V_{16}$	$V_{17}$	$V_{18}$	$V_{19}$	$V_{20}$
$V_1$	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1
$V_2$	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
$V_3$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$V_4$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$V_5$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$V_6$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$V_7$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$V_8$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$V_9$	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$V_{10}$	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
$V_{11}$	<b>5</b>	1	1	1	0	0	0	0	0	0
$V_{12}$	1	<b>5</b>	1	1	1	0	0	0	0	0
$V_{13}$	1	1	<b>5</b>	1	1	1	0	0	0	0
$V_{14}$	1	1	1	<b>6</b>	1	1	1	0	0	0
$V_{15}$	0	1	1	1	<b>6</b>	1	1	1	0	0
$V_{16}$	0	0	1	1	1	<b>8</b>	1	1	1	1
$V_{17}$	0	0	0	1	1	1	<b>6</b>	1	1	1
$V_{18}$	0	0	0	0	1	1	1	<b>7</b>	1	1
$V_{19}$	0	0	0	0	0	1	1	1	<b>6</b>	1
$V_{20}$	0	0	0	0	0	1	1	1	1	<b>6</b>

Відповідно до варіанта 14 в умовах застосування активних завад гарантований зв'язок можуть забезпечити всі двадцять вузлів. У таких умовах вся мережа має 104 варіанти маршрутизації передавання даних з 380 можливих (27%).

У разі незміної форми топології мобільної радіомережі на місцевості в конфігурації кола і різній кількості вузлів за однакового параметра дальності зв'язку завадостійкість радіомережі змінюється і має вигляд графіка (рис. 4.6). Якщо конфігурація наближена до форми кола, стійкість радіомережі, найкращі показники демонструє динамічна конфігурація топології із десяти вузлів, зі збільшенням відстані між вузлами втричі відсоток гарантованої маршрутизації

складає 68%, і за збільшеної відстані до п'яти разів відсоток гарантованої маршрутизації змінюється до 46%. що забезпечує високий рівень завадостійкості радіомережі. Зі збільшенням кількості вузлів до п'ятнадцяти і двадцяти відсоток гарантованої маршрутизації змінюється із 60–55% до 29–27%. Показники для радіомережі з п'ятьма вузлами є недостатніми для топологічної завадостійкості.

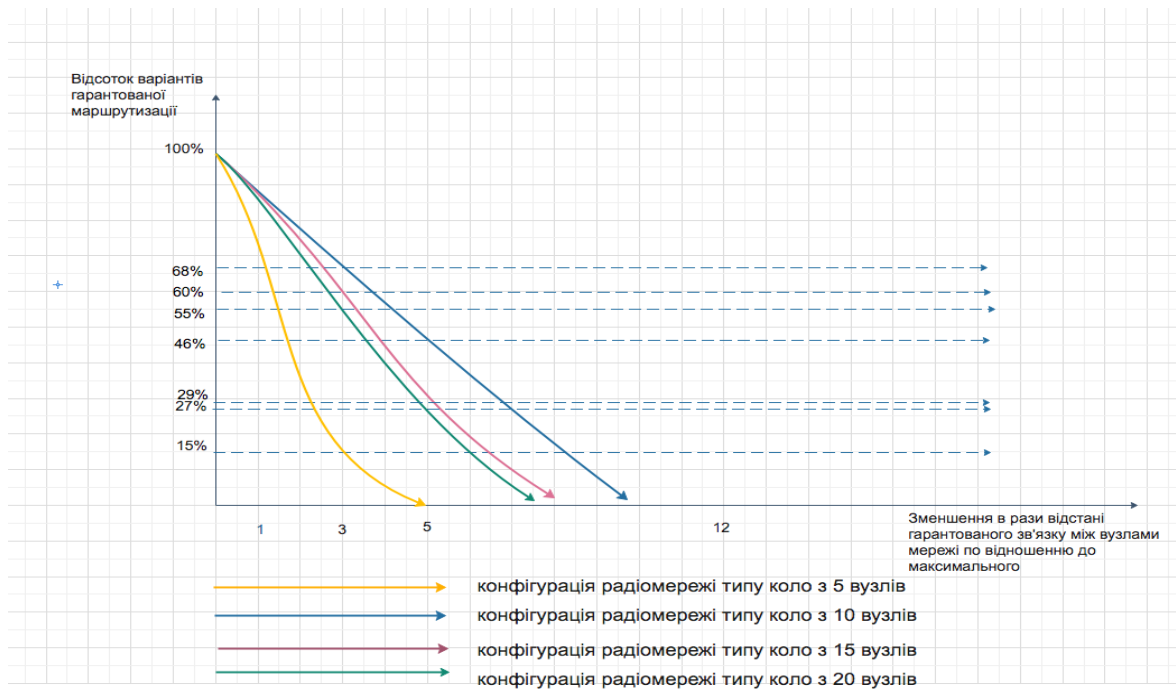


Рис. 4.6. Графік залежності варіантів маршрутизації за конфігурації кола від кількості вузлів у мобільній радіомережі

Виконаємо розрахунки і проаналізуємо отримані результати завадостійкості радіомережі з *режимом ретрансляції*. Маршрут передавання інформації від віддаленого вузла або сенсора радіомережі до пункту контролю встановлюється за умови мінімальної тривалості. Вимірювання в умовах природних і штучних завад потребують певної реконфігурації початкової топології. Розглянемо вузли мережі, що здатні приймати, перетворювати, передавати інформацію, зміна конфігурації системи можлива за умови введення чи виведення несправних датчиків або вузлів. Організація зв'язку між вузлами

в радімережі графічно зображується топологію мережі чи графом. Залежно від типу з'єднань вузлів розрізняють топології: шину, кільце, зірку, коміркову та їх комбінації. Вибір топології мережі визначається факторами, середніх є віддаленість, безпечність, надійність, вартість та інші, які розглядають під час розроблення системи. Передавання інформації в радімережі відбувається згідно з правилами, що називають протоколами. Нами встановлюється адреса користувача або групи, їх кількість і швидкість передавання даних. Передбачається передавання інформації через транзитні вузли, тобто необхідне прокладення маршруту. Далі розглянуто завдання маршрутизації та математичного моделювання поведінки мобільної радімережі з двонапрямними зв'язками між її елементами (вузлами) в умовах завад. Математичну модель сенсорної радімережі передавання даних (4.4) можна подати зв'язаним графом:

$$G = (V, E), \quad (4.4)$$

де  $V$  – множина вузлів графу, що являє собою радімережу сенсорів;

$E$  – множина ребер графу, що з'єднує вузли і відображає можливий маршрут передавання даних.

Шлях від вузла  $s$  до вузла  $f$  довжиною  $l$  називають упорядкованою послідовністю  $(E_s, \dots, E_f)_l = (E_s, E_i), \dots, (E_{i+q}, E_{i+q+1}), \dots, (E_l, E_f)$ .

Зваженою довжиною шляху (4.5) від  $s$  до  $f$  називають число:

$$L(s, f) = \sum_{(j, j+1) \in (E_s, \dots, E_f)} w_{i, j}, \quad (4.5)$$

Уведемо множину всіх припустимих шляхів  $\Xi_{sf}$ , тоді найкоротший шлях (4.6) визначається виразом

$$L'_{sf} = \min_{(E_s, \dots, E_f) \in \Xi_{sf}} \sum_{(j, j+1) \in (E_s, \dots, E_f)} w_{i, j}. \quad (4.6)$$

Ставиться завдання визначити можливість щодо визначення найкоротшого шляху в комп'ютерній мережі в умовах впливу природних чи штучних завад на систему [64].



Передавання даних у мережі відбувається за правилами, що регламентуються застосовуваними протоколами, згідно з якими встановлюються адреса, розмір і структура пакета, що передається, швидкість передавання даних. Якщо кількість вузлів велика, тоді виникає необхідність передавати інформацію через транзитні вузли. Але при цьому стає необхідним прокладати маршрут для забезпечення мінімуму часу на доставлення інформації, що досягається мінімумом транзитних вузлів або наявністю каналів з високою пропускнуою здатністю та надійністю ліній зв'язку. Через вузол може проходити декілька під потоків, їх відрізняють за адресою пункту призначення. Зрозуміло, щоб визначити маршрут, який би забезпечив однаковий час потоків різного обсягу даних, необхідно враховувати швидкість передачі, яку мають окремі лінії, і надавати можливість розпаралелювання підпотоків та їх збирання. Перемикання вузлів для передавання підпотоків здійснюється мультиплексуванням вільних каналів. Завдання полягає у визначенні маршруту проходження інформації кінцевому агенту. Розрізняють статичні та динамічні маршрути [64].

Пошук у ширину. Проводиться обхід кожної вершини  $V_i \in V$  графу  $G$ , запам'ятовується кількість пройдених дуг  $E_i \in E$ , Мінімальна відстань  $L(s, f)$  між точками  $s$  і  $f$  відповідає найменшій кількості дуг (4.7), що з'єднують вершини  $s$  і  $f$ :

$$L'(s, f) = \min_{(E_s, \dots, E_f) \in \mathcal{E}_{sf}} \sum_{i=1}^N E_i. \quad (4.7)$$

Приклад застосування алгоритму подано на рис. 4.7.

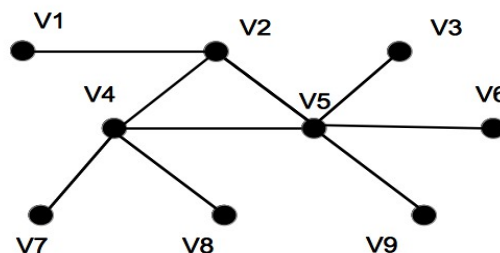


Рис. 4.7. Комп'ютерна мережа, що складається з 9 вузлів.

Найкоротший маршрут передачі інформації між вершинами 1–9 за алгоритмом відповідно до рис. 4.7 становить  $L(1, 9)=3$ . Оцінкою продуктивності графа виступає часова складність  $O(i)$ , що визначається кількістю операцій за алгоритмом. За цим алгоритмом усі вузли та ребра скануються одноразово, тому часова складність визначається їх кількістю, а саме  $O(M+N)$  [64].

*Зміна структури системи.* Основною властивістю радіомережі є те, що вона у процесі виконання завдань може змінювати свою структуру під дією зовнішніх факторів. Унаслідок цього зменшується розмір системи. Конфігурація може відновлюватися і навіть збільшуватися за рахунок підключення нових елементів. На зовнішні події (завади) реагує зміна топології системи. Під реконфігурацією інформаційної системи будемо розуміти зміну будови системи, яка стосується розміру або її топології. Особливістю реконфігурації є перебудова структури та топології системи з метою усунення перевантажень та збоїв у роботі системи. Вважається, що мережа виконує свої функції, поки між вузлами здійснюється обмін інформації. Приклад реконфігурованої системи показано на рис. 4.8.

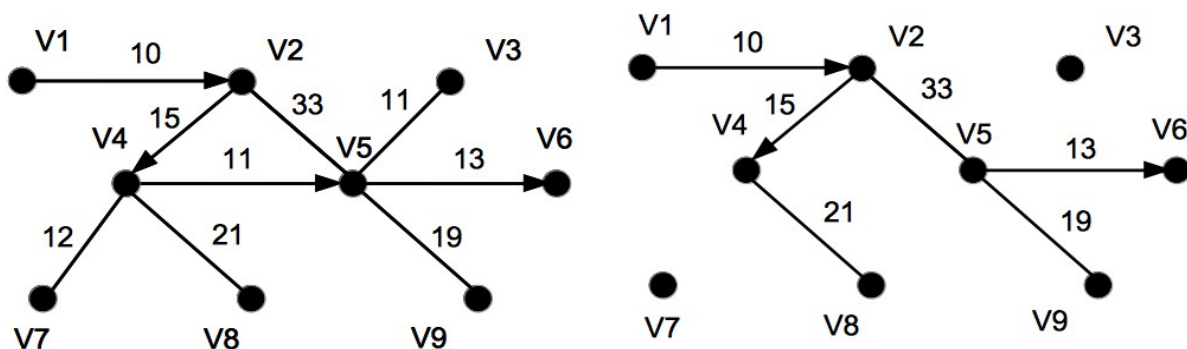


Рис. 4.8. Зміна будови радіомережі в разі втрати зв'язку вузлів V3 та V7

Швидкість реконфігурації повинна перевищувати швидкість виявлення збоїв у радіомережі.

Відповідно до загального уявлення про радіомережу вона є системою з обмеженою кількістю можливих станів. Тому її поведінку можна промоделювати за допомогою математичного апарату аналізу марківських ланцюгів. Будемо вважати, що у процесі роботи мобільна радіомережа, яка складається з кінцевої множини елементів  $N$ , обмінюється інформацією між усіма елементами за протоколами OSPF або RIP, що відповідає умовам нормального функціонування системи. Початковий стан мережі позначимо через  $S_1$ . Якщо з якихось не випадкових причин починають виходити з ладу елементи мережі або губитися обмін інформацією, то відбувається перехід системи до іншого стану. Будемо також вважати, що елементи радіомережі не перевантажуються одночасно, а один за одним, тому здійснюються послідовні переходи зі стану  $S_1$  у стани  $S_2, S_3, \dots, S_i$  через певні інтервали часу  $\Delta t$ ,  $i$  означає номер стану. Послідовний набір станів радіомережі та переходів між ними утворює ланцюг Маркова. Оскільки ланцюг послідовний, то функціонування системи можна подати у вигляді схеми «загибель–розмноження» [64].

Нехай мобільна радіомережа складається з  $n$  вузлів, тому відповідно до підходу за схемою «загибель–розмноження» уведемо стани  $S_i, i=1..n+1$ , де  $S_1$  – стан мережі, що відповідає функціонуванню всіх вузлів без перевантажень. За умови впливу зовнішніх і внутрішніх факторів погіршується пропускну здатність каналів у мережі з фіксованою інтенсивністю  $\lambda$ . При цьому здійснюється перехід у стани, коли вузли поступово втрачають пакети, послідовно один за одним. Таким чином, здійснюється перехід у стан  $S_2$ , коли не працює один вузол, другий вузол, третій вузол і т.д., а відповідно  $S_{n+q}$  – радіомережа припинила виконувати завдання у зв'язку з виходом з ладу  $(n - q)$  вузлів. Система також може вживати заходи щодо нарощування пропускну здатності, що відбувається з інтенсивністю  $\mu > \lambda$ . При цьому з інтенсивністю  $\mu$  відбуваються послідовні переходи зі станів  $S_i$  у стани  $S_{i-1}$ . Знайдемо ймовірності  $p_i$  знаходження радіомережі в кожному з кінцевих станів  $S_i$  і проаналізуємо їх. Ймовірності знаходження системи у фінальних станах знаходяться за

формулами (4.8).

$$p_i = p_0 \frac{\prod_{k=1}^i \lambda^k}{\prod_{k=1}^i \mu^k}, i \neq 0, \quad p_0 = \left( 1 + \sum_{i=1}^n \frac{\prod_{k=1}^i \lambda^k}{\prod_{k=1}^i \mu^k} \right)^{-1} \tag{4.8}$$

Застосування мобільних радіомереж не можливе без вивчення проблемних питань, головним серед яких є отримання інформації від окремих вузлів. Цей процес ґрунтується на динаміці топології, відповідно до якої встановлюється адресний обмін інформацією за мінімальним маршрутом. Топологія мобільних радіомереж військового призначення не є сталою, а піддається реконфігурації в умовах дії реальних завад.

Аналізувати функціонування системи зручно за відомою схемою «загибель–розмноження» вузлів та встановлення відповідних їй показників, до яких можна віднести відносний розмір системи, точність системи та швидкість реконфігурації у сталому режимі роботи чи для певного моменту функціонування системи [64].

Розглянемо цю задачу для випадку  $n = 5, \lambda = 0,5, \mu_1 = 0,8, \mu_2=1,6, \mu_3=2,4$ . Результати розрахунку за формулами наведено табл. 4.16, які показують деградацію стану радіомережі в умовах завад (рис. 4.10), та виконано розрахунок (рис. 4.9).

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
лябда	0,5									
мю	0,8	1,6	2,4							
вар1	0,625	0,390625	0,244140625	0,1525878906	0,0953674316					
вероят1	0,3987684519	0,2492302825	0,1557689265	0,0973555791	0,0608472369	0,0380295231				
вар2	0,313	0,098	0,031	0,010	0,003		0,3987684519	0,6881408811		0,7917314004
вероят2	0,6881408811	0,2150440254	0,0672012579	0,0210003931	0,0065626228	0,0020508196	0,2492302825	0,2150440254	0,1649440417	0,1649440417
вар3	0,208	0,043	0,009	0,002	0,000		0,1557689265	0,0672012579	0,034363342	0,034363342
вероят3	0,792	0,165	0,034	0,007	0,001	0,000	0,0973555791	0,0210003931	0,0071590296	0,0071590296
							0,0608472369	0,0065626228	0,0014914645	0,0014914645
							0,0380295231	0,0020508196	2,80962248969447E-006	2,80962248969447E-006

Рис. 4.9 Розрахунок

Результати розрахунку

Таблиця 4.16

$\mu$	$\rho_0$	$\rho_1$	$\rho_2$	$\rho_3$	$\rho_4$	$\rho_5$
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
-------	------	-------	-------	-------	-------	-------

Аналіз рис. 4.9 показує, що чим більше значення  $\mu$ , тим краще система справляється з пакетами, більша ймовірність знаходження її у стані з мінімальними затримками та менша ймовірність знаходження у стані з найбільшими затримками. Застосування мобільних радіомереж не можливе без вивчення проблемних питань, головним серед яких є отримання інформації від окремих вузлів.

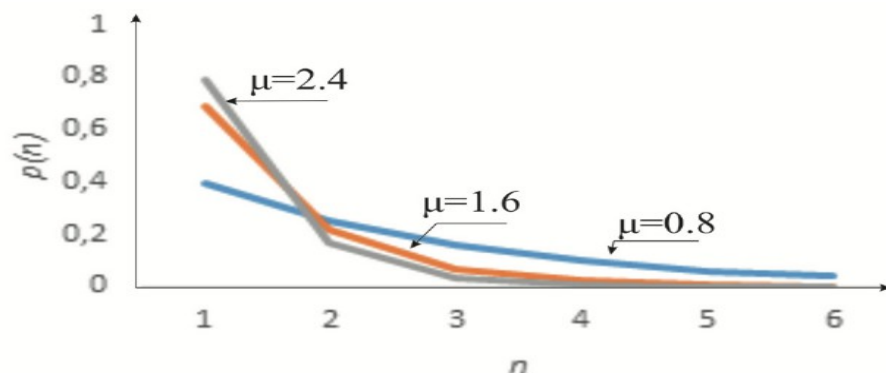


Рис. 4.10. Деградація радіомережі в умовах завад

Цей процес ґрунтується на динаміці топології, відповідно до якої встановлюється адресний обмін інформацією за мінімальним маршрутом. Аналіз функціонування системи зручно виконувати за відомою схемою «загибель–розмноження» вузлів та встановлення відповідних їй показників, до яких можна віднести відносний розмір системи, точність системи та швидкість реконфігурації у сталому режимі роботи чи для певного моменту функціонування системи. Швидкість реконфігурації системи асоційовано з інтенсивністю відмов та відновленням вузлів радіомережі. У розрахунках за схемою «загибель–розмноження» показано, що реконфігурація ефективна, якщо вона відбувається зі швидкістю більшою за інтенсивність виведення вузлів з ладу приблизно у 2–5 разів.

#### **4.4. Фізична модель (робочий прототип) цифрової радіостанції PRR та компоненти самоналагоджувальної радіомережі**

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що в роботі розроблено, обґрунтовано та доведено до практичної реалізації на рівні фізичної моделі (робочих прототипів) першого рівня перспективної моделі військової самоналагоджувальної радіомережі. Здобувачем у співавторстві з партнерами, з урахуванням фінансового та технологічного підтримання приватної фірми розробника криптографічних засобів захисту інформації, розроблено і виготовлено радіостанцію-модем класу PRR (Personal Role Radio) (2,4 ГГц) із вбудованою системою підтримання GPS позиціонування. Отримано позитивні відгуки про перспективність розробки від Центрального науково-дослідного інституту озброєння та військової техніки Збройних сил України та рекомендації від департаменту виробництва Оборонпрому щодо виробництва (дод. В). Виготовлені робочі прототипи радіостанції-модема класу PRR. Використана технологія розширення спектра DSSS, FHSS у поєднанні з низькою щільністю переданої потужності при створенні PRR лягли в основу її переваг: мінімізація ймовірності виявлення факту передавання і перехоплення інформації; додаткова безпека забезпечується за допомогою протоколу шифрування AES-256 в режимі CBC (Cipher Block Chaining); реалізований захист від «нав'язування»; використання технології когнітивного радіо для підвищення надійності та якості зв'язку в умовах радіоелектронної протидії.

Реалізовані механізми, які забезпечують завадозахищеність і прихованість роботи, це технології розширення спектра DSSS і FHSS. Метод криптографічного захисту інформації за стандартом AES – симетричний алгоритм блокового шифрування, розмір блока 128 біт, ключ 256 біт (дод. В).

Уперше удосконалено архітектуру мобільної радіомережі, другий – п'ятий рівні самоналагоджувальної радіомережі якої оснащуються комунікатором або радіомодемом з мультиранговою системою комунікації (2,4–18 ГГц) [1,12,13–15]. Запропонована модель не використовується в сучасних системах керування

мобільними радіомережами.

Уведено нові процеси функціонування інтелектуальної системи керування вузлом мобільної радіомережі:

- рівень шумів або сигналу завад на вхідному тракті комунікатора (налаштування пошуку) формує реакцію на надмірні рівні завад і керує підсистемою вибору рангу (смуги частот) вузла радіомережі;

- контроль зв'язності комутації вузлів мобільної радіомережі формує реакцію підсистеми контролю топології на зміни форми конфігурації абонентів мобільної радіомережі в русі та відображає зміни в системі ГІС.

У дисертації вдосконалено перспективну архітектуру мобільної радіомережі, у якій є елементи мультирангової системи комунікації. Під час роботи в умовах активних пзавад [14,15,66,93] така модель дозволяє переводити всю радіомережу на іншу смугу частот. У загальноприйнятій еталонній моделі ІСК вузлом мобільної радіомережі вводиться підсистема вибору рангу радіомережі. Алгоритм функціонування цієї підсистеми складається з таких етапів:

- складання підсистеми контролю, збирання, обробки і зберігання даних випадків, за яких вузол перевантажується сигналом активної завади;

- аналізування показників функціонування вузла та всієї радіомережі;

- здійснення переходу вузла і всієї радіомережі на інший ранг (смугу частот), якщо певні показники функціонування мережі не задовольняють вимог функціонування вузла і мобільної радіомережі.

Підсистема керування топологією загальноприйнятої еталонної моделлю 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 системі ГІС. Моделювання та аналіз змін топології мобільної радіомережі й візуалізація результатів виконано за допомогою геоінформаційної системи ArcGIS 10 [50, 97].

Здобувачем у працях [74–76] були виконані дослідження за науково-дослідною роботою шифр «Развитие - 3» (§ 3.6 Розробка і випробування системи формування ширококутових сигналів. У підсумковому звіті; § 4.2.2 Результати випробування системи захисту від завад). Проведено дослідження статистичних моделей сигналів і завад як просторово–часових польових структур, які лягли в основу 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. У праці [77] здобувачем у співавторстві наведено результати моделювання, проектування, експериментальних досліджень та випробувань пропускних смуг електричних фільтрів з надвисокою крутістю скатів амплітудно–частотної характеристики в широкому спектрі частот дециметрового діапазону з використанням методу низькочастотних прототипів фільтрів.

Здобувачем у працях [94–96] виконано аналіз стану мережевих систем охорони стратегічних об'єктів і запропоновано варіанти розроблення моделей мережевих структур фізичного захисту стратегічних і великих промислових рознесених об'єктів на базі систем зображення образної інформації та просторово розподілених динамічних датчиків. Розроблено складну інтегровану систему безпеки з інтегрованими багаторівневими системами відеоспостереження. Побудовано модель, у якій вся система сформована з декількох відносно самостійних і досить стійких осередків. Ці осередки побудовані за принципом відкритої системи з максимально можливим ступенем вільності внутрішніх зв'язків і можливістю гнучкої адаптації до різноманіття завдань. Усі осередки об'єднані за просторово-тимчасовим характером завдань з жорсткою ієрархією зв'язків.

#### **Висновки за розділом 4**



1. Аналіз динаміки зміни топології групи з десяти вузлів радіомережі без режиму ретрансляції показав, що найкращим варіантом є конфігурація на місцевості, яка близька до витягнутого еліпса. У такому випадку група стійко керована навіть в умовах впливу активних завад, гарантоване з'єднання забезпечується за наявності щонайменше трьох маршрутів (ребер) між абонентами (вузлами). У разі розосередження абонентів групи, за незмінності форми конфігурації (розташування кожного абонента відносно інших «сусідів» приблизно залишається постійним), збільшуються відстані між вузлами мобільної радіомережі і кількість гарантованих з'єднань зменшується.

Якщо між абонентами відстані збільшити втричі, кількість гарантованої маршрутизації, яка забезпечує стійкий зв'язок, становитиме 86% за конфігурації у формі витягнутого еліпса, 82% – за конфігурації у формі витягнутої лінії зіткнення і 68% – за конфігурації у формі кола. Усі показники характеризують високу стійкість перед завадами мобільної групи радіомережі за різних форм конфігурацій топології.

У разі збільшеній відстані між вузлами мобільної радіомережі в п'ять разів, кількість гарантованої маршрутизації, яка забезпечує стійкий зв'язок, становить 56% за конфігурації у формі витягнутого еліпса, 50% – за конфігурації у формі витягнутої лінії зіткнення і 46% – за конфігурації у формі кола. Зв'язок із застосуванням активних завад, може бути забезпечений для шести абонентів групи (з десяти) за конфігурації у формі кола. Для інших конфігурацій зв'язок із застосуванням активних завад, може бути забезпечений для дев'яти абонентів з десяти, що показує високу керованість групою.

Зі збільшенням відстані між абонентами мобільної радіомережі понад шість – сіми разів кількість гарантованої маршрутизації зменшується до 30% і зв'язок із застосуванням активних завад, стає неможливим – керованість мобільною групою втрачається для всіх видів топології.

2. Аналіз динаміки топології конфігурації у формі кола мобільної радіомережі залежно від кількості вузлів без режиму ретрансляції показав, що

найкращим є варіант, коли група має від десяти одиниць вузлів в умовному графі. Найефективнішою є конфігурація радіомережі на місцевості у формі кола та кількості вузлів десять. Якщо кількість вузлів п'ять, завадостійкість радіомережі має найгірші показники і керованість в умовах впливу активних завад порушується навіть за умови розосередження у три рази. Зі збільшенням кількості вузлів завадостійкість мобільної радіомережі змінюється аналогічно показнику з кількістю вузлів десять; незначне зменшення відсотка варіантів гарантованої маршрутизації пояснюється концентрацією вузлів на краю конфігурації кола. У разі рівномірного розосередження абонентів по всій площі конфігурації у формі кола, параметри значно зростають. Мобільні радіомережі з кількістю вузлів від десяти і більше мають високі показники завадостійкості при впливі на неї активних завад, за умови роботи без режиму ретрансляції.

3. Виконано розрахунки та проаналізовано отримані результати завадостійкості радіомережі з режимом ретрансляції. Розглянуто завдання маршрутизації та математичного моделювання поведінки мобільної радіомережі з двонапрямними зв'язками між її вузлами. Швидкість реконфігурації системи асоційовано з інтенсивністю відмов та відновленням вузлів радіомережі. Реконфігурація ефективна, якщо вона відбувається зі швидкістю більшою за інтенсивність виведення вузлів з ладу приблизно у 2–5 разів.

Список використаних джерел у цьому розділі наведено у повному списку використаних джерел під номерами [79–98].

## ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішено головне 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 такі висновки:

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 завадостійкості 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.

**ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ**

1. Бунін С.Г., Войтер А.П., Ільченко М.Е., Романюк В.А. Самоорганізуючіся радіосети со сверхширокополосними сигналами. - Київ, Наукова думка, 2012 р., с.19–21
2. Пашков С.І. Застосування генетичного алгоритму для удосконалення топології когнітивних радіомереж. - магістерська дисертація, НТУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» - 2018р., с16–20.
3. Маргарян С., Харламов О., Хромцев О., Сабунін О. - Конвенціональні широкопasmові технологічні радіомережі обміну даними. - Беспроводные технологии.- №1 - 2010 - с 32.
4. Радіоустаткування мереж передачі даних. - Інтернет ресурс - <https://www.ixbt.com/comm/radiodata.html>
5. Романюк В.А. Еволюція тактичних радіомереж. Тези доповідей та виступів учасників VI науково-практичного семінару „Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення” – К.: ВІТІ НТУУ „КПІ”, 2011. – С. 45–52.
6. Сальник С.В., Єфанова К.О., Бригадир С.П. Аналіз мобільних засобів зв'язку тактичної ланки управління військами. - Х.: Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил. - 2018, N4 (58) - с.62-70.
7. Романюк В.А., Сова В.А., Жук О.Я. Концепція ієрархічної побудови інтелектуальних систем управління мобільними радіомережами військового призначення - Збірник наукових праць ВІТІ НТУУ" КПІ. - 2010., 125–128.
8. Романюк В.А. Мобільні радіомережі (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. 12–18.
9. G. Yang, S. K. Ho and R. Zhang. Throughput optimization for massive MIMO systems powered by wireless energy transfer // IEEE J. Sel. Areas Commun. 2015. Vol. 33.

№ 8., р. 3-11.

10. Войтер А. П. Управление задержкой передачи в пакетных радиосетях // Управляющие системы и машины.– 2007., № 4, с.47–49.

11. Гурський Т.Г., Сова О.Я., Гриценко К.М., Гай Ю.І. Аналіз заводозахисності радіомереж з використанням повітряних ретрансляторів в умовах навмисних шумових завод. - Збірник наукових праць ВІПІ. - N 4 — 2018 р., с. 32.

12. Проміжний Звіт по науково-дослідній роботі шифр "Сіріус". - НА НГУ, № держреєстрації 0119U101325 – 2020 р. с.76–78.

13. Проміжний Звіт по науково-дослідній роботі шифр "Тюльпан". - НА НГУ, № держреєстрації 0118U006194 — 2020 р., с. 45-47.

14. Перепеліцин С.О. Лесько О.В.. Використання технології надширокосмугових сигналів та самоналагоджуваної мережі в управлінні БПЛА військового призначення. - К. Вісник інженерної академії України. - № 4, 2019 - с. 28-34.

15. Перепеліцин С.О. Система захисту від загроз удару БПЛА із використанням блоків нейромережевого аналізу.–К. Наукоємні технології, НАУ, №1(45),2020 р., с. 19–26.

16. Соковишин М. Проектирование средств радиосвязи стандарта 5G New Radio — проблемы и пути решения. - Беспроводные технологии.- № 4, 2018 г., с. 52-55.

17. Загальні відомості про систему TETRA. – <http://www.sagatelecom.ru/encyclopedia/protocol/detail>.

18. Старченко С.В., Матвієць А.Б. Система цифрового транкінгового зв'язку TETRA – Мобільні системи. – 2001, № 12. С. 25–27.

19. Овчинников А.М., Воробьев С.В., Сергеев С.И. Открытые стандарты цифровой транкинговой радиосвязи. Серия «Связь и бизнес»,– М .2000, с.166.

20. Семенова О.О.,Семенов А.О., Белов В.С. Системы рухомого зв'язку.– Навчальний посібник. - В. Вінницький національний технічний університет. - 2017, с. 77, 136-137.

21. Бойко М.П. Системи стільникового зв'язку. - конспект лекцій. - О. Одеська національна академія зв'язку ім. О.С.Попова. - 2004, с. 11-13.

22. Плотніков М.Д., Москалець М.В. Системи зв'язку з рухомими об'єктами. – Х. Харківський національний університет радіоелектроніки.–2010.с. 120-122, 138-140.
23. Рекомендацій МСЕ-R S.725. Технічні характеристики VSAT станцій. – МСЕ, 2014. – 32 с.
24. Білий О. А., Шолудько В. Г., Малих В.В., Гай Ю.І. Перспективи розвитку системи супутникового зв'язку ЗСУ. – К. Збірник наукових праць ВІТІ № 2 – 2018, с.10–11.
25. Глобальный спутниковый оператор SES – 11 лет успешного развития в XXI веке. – [http://vestnikglonass.ru/stati/globalnyy\\_sputnikovyy\\_operator\\_ses\\_11 лет\\_uspeshnogo\\_razvitiya\\_v\\_xxi\\_veke/](http://vestnikglonass.ru/stati/globalnyy_sputnikovyy_operator_ses_11 лет_uspeshnogo_razvitiya_v_xxi_veke/).
26. Бойко Ю.М., Мішан В.В., Розрахунок затухання на радіотрасі передачі інформації супутник метор - земля. – Електротехнічні та радіотехнічні вимірювання. ХНУ – 2010, с. 95.
27. Авдєєнко Г.Л., Бунін С.Г., Наритник Т.М., Єрмаков А.В., Волков В.В. Обґрунтування частотних діапазонів для високошвидкісних безпроводових телекомунікаційних систем терагерцового діапазону.– К. Проблеми телекомунікацій No 1 (20) – 2017, с. 31, 35.
28. Блаунштейн Н. Пулинец С.А. Коэн Я. Расчет основных параметров радиосигналов в канале спутник-земля при распространении через возмущенную ионосферу - Геомagnetизм и аэрономия, том 53 N 2 - 2013 с 215–227.
29. Kirichek R., Kulik V. Long-Range Data Transmission on Flying Ubiquitous Sensor Networks (FUSN) by Using LPWAN Protocols. - Communications in Computer and Information Science, Vol. 678. 2016. pp. 442–453.
30. Кумарітова Д. Л., Киричок Р. В. Огляд і порівняльний аналіз технологій LPWAN мереж. – Інформаційні технології і телекомунікації, том 4 N 4. – 2016, с.34, 39.
31. Dmytro Kucherov, Andrei Berezkin and Serhii Perepelitsyn. Some Features of LoRa Technology under Multi-Ray Reception. – 2020 IEEE International Conference on Problems of Infocommunications Science and Technology. – October 6-9, 2020., 6–9 p.

32. Tactical Radios 2011 //Compendium by Armada. No 4.– 2011. 32 p.
33. Communication Middleware for Tactical Environments: Observation, Experience, and Lessons Learned / [Suri N., Bervengu E., Torsonesi M., Stefanelli C.] // IEEE Communications Magazine. – 2009. – Vol. 47, No 10. – P. 56 – 63.
34. Міночкін А.І., Романюк В.А., Сова О.Я. Аналіз методів управління навантаженням в мобільних радіомережах на транспортному рівні моделі OSI // Збірник наукових праць № 3. – К.: ВІТІ НТУУ “КПІ”. – 2006. – С. 55 – 65.
35. P. Gajewski. Resource Management in Mobile Military Networks/ P. Gajewski, J.Jarmakiewicz, P. Lubkowski, J. Krygier, M. Lies, P. Sevenich// RTO Information Systems Technology Symposium, Prague, Czech Republic, April 2008. p.57-58.
36. Aparna P.S. Cyclostationary Feature Detection in Cognitive Radio using Different Modulation Schemes / P.S.Aparna, M.Jayasheela // International Journal of Computer Applications Volume 47– No.21, June 2012, p.12-14 .
37. Янишин В.Б. Моделі та алгоритми управління радіочастотним спектром в когнітивних радіомережах - на здобуття наукового ступеня ктн, НУ «Львівська Політехніка» - 2018, с.30.
38. Івченко Д.С. Алгоритми машинного навчання для моніторингу серцево-судинної системи пацієнта. Магістерська дисертація. - К. КПІ ім. Ігоря Сікорського. - 2018, с.42-43.
39. Лаврут О. О. Математичне моделювання процесів функціонування фрагменту мобільного компонента системи зв'язку ЗС України / О. О. Лаврут, Л. М. Блажко // Системи обробки інформації. - 2011. - Вип. 8. - С. 170-174.
40. Лаврут О.О., Стрюк О.Ю., Польщиков К.О. Тензор – можлива модель опису системи супутникового зв'язку як складного динамічного об'єкту. - Системи озброєння і військова техніка .– 2009. – No 4(20). – С. 131 – 134.
41. Лаврут О.О., Лаврут Т.В., Мартиненко А.М. Описание системы спутниковой связи как сложного динамического объекта при помощи метода Крона - Радиоэлектронні і комп'ютерні системи. – 2010.– No 7 (48).– С. 251 – 256.

42. Поповський В.В., Сабурова С.О., Олійник В.Ф., Лосєв Ю.І., Лемешко О.В. Математичні основи теорії телекомунікаційних систем.–Х.: ТОВ “Компанія СМІТ”, 2006, с 365.

43. Малярчук М.,В., Колачев С.П, Швець А.А. Архітектура мобільного компоненту перспективної системи зв'язку і автоматизації тактичної ланки управління Збройних Сил України з використанням опорної мережі на радіорелейних станціях. - Збірник наукових праць ВІТІ НТУУ “КПІ”, вип. 3. – 2009.– С. 45 – 50.

44. Bryan Bischof. Higher order co-occurrence tensors for hypergraphs via face-splitting. Published 15 February, 2020, Mathematics, Computer Science, - код доступа <https://arxiv.org/pdf/2002.06285v1.pdf>.

45. Ф. Харари. Теория графов. М.: Мир, - 1973, 300 с.

46. Градосельская Г. В. Сетевые измерения в социологии: Учебное пособие / Под ред. Г. С. Батыгина. М.: Издательский дом «Новый учебник», 2004.–248 с.

47. Слюсар В.И. Торцевые произведения матриц в радиолокационных приложениях// Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника.- 1998. - Том 41, № 3.- С. 71 - 75.

48. Слюсар В.И. Семейство торцевых произведений матриц и его свойства// Кибернетика и системный анализ. – 1999.- Том 35; № 3.- С. 379-384.- DOI: 10.1007/BF02733426

49. Минович А. И., Рудаков В. И., Слюсар В. И. Основы военно-технических исследований. Теория и приложения. Том. 2. Синтез средств информационного обеспечения вооружения и военной техники // Под ред. А. П. Ковтуненко. - Киев: «Гранма». - 2012.- С. 7 - 98; 354 - 521.

50. 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.

51. А.С. Волков, С.С. Муратчаев, Ю.А. Кульпина. Разработка имитационной модели двухранговой сети MANET– Труды МАИ,Выпуск №



---

109, DOI: 10.34759/trd-2019-109-13.

52. Симоненко О.А., Уманець Я.Л., Романюк В.А., Сова О.Я. Аналіз можливостей використання інтелектуальних агентів для побудови системи управління вузлами радіомереж класу MANET. // Збірник наукових праць ВІТІ НТУУ "КПІ". – 2013. – № 1. – С. 76-84.

53. Міночкін А.І., Романюк В.А., Шаціло П.В.. Виявлення атак у мобільних радіомережах. // Збірник наукових праць № 1. – К.: ВІТІ НТУУ "КПІ". – 2005. – С. 102–111.

54. Міщенко А.О., Шишацький А.В., Бондаренко Т.В., Бігун Н.В. , Ляшенко Г.Т. Аналіз використання сучасних технологій радіозв'язку у збройних силах провідних країн світу. - Системи обробки інформації, 2019, випуск 4 (159), с.53-54.

55. Dahlman E. 4G LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband / E. Dahlman, S. Parkvall, J. Skold. – Oxford, UK: Academic Pressis an imprint of Elsevier, 2011. – 431 p.

56. Борисов В.И., Зинчук В.М., Лимарев А.Е., Мухин Н.П. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты. - М. Радио и Связь". - 2000. - 384 p.

57. Nee R. V. OFDM For Wireless Multimedia Communications / R. V. Nee, R. Prasad / Norwood, MA: Artech House, 2000. – 426 p.

58. Prasad. R. OFDM for wireless communications systems / Artech House Universal Personal Communications series, 2004. – 291 p.

59. Золотарев В. В. Помехоустойчивое кодирование: методы и алгоритмы справочник / В. В. Золотарев, Г. В. Овечкин // под. ред. Ю. Б. Зубарева. – М. : Горячая линия, Телеком. – 2004. – 126 с.

60. Williams F. J. Sloane N. J. A. The Theory of Error-Correcting Codes. Parts 1, 2. Bell Laboratories, NJ, USA. – 1977. – 744 p.

61. MacKay D. Good error-correcting codes based on very sparse matrices. IEEE Trans. Inf. Theory, vol. 45, no. 2, March 1999. – pp. 339–431.

62. Bevan D. D. Gaussian channel model for mobile multipath environment / D. D. N. Bevan, V. T. Ermolayev, A. G. Flaksman, I. M. Averin // *EURASIP Journal on Applied Signal Processing*, 2004, No. 9. – pp. 1321-1329.
63. Ohtsuki T. LDPC codes in communications and broadcasting. *IEIC Trans. Commun.*, vol. 90-B, no. 3, March 2007. – pp. 440–453.
64. Кучеров Д. П. Реконфігурація мультисенсорної системи за умови впливу дестабілізуючих факторів. // *Sensor Electronics and Microsystem Technologies*, 2016, № 2–с. 101-112.
65. Беленок Б.І. Паралельні алгоритми тренування нейронних мереж. // *Дипломна робота. НТУУ «КПІ» НК «ІІСА»* . - 2017, с.44.
66. Kucherov D.P., Tkachenko V. G. , Kashkevych, I.F., Androshchuk A. O. , Perepelitsyn S. O. Recognition of text phrases distorted by interference by back propagation neural network. // *Electronics and Control Systems* 2020. N 3(65)–с. 46-54.
67. Лагутенко О.И. Современные модемы. – М.:Эко- Трендз, 2002. – 343 с.
68. Berrou C., Glavieux A., Thitiumjshima P. Near Shannon limit error correcting coding: Turbo codes // *Int. Conf. on Commun.* – Geneva, Switzerland, 05.1993. – P. 1064-1070.
69. Giancristofaro D., Giubilei R., Novello R., Piloni V., Touth J. Performances of Novel DVB-RCS Standard Turbo Code and its Use in On-Board Processing Satellites // *Pro- ceedings of the EMPS workshop, in IEEE EMPS/PIMRC.* – London, 17-21 September 2000. – P. 345-349.
70. В. Різник, Д. Ю.Скрибайло-Лесків. Вдосконалення ефективності циклічних кодів комбінаторальними методами оптимізації. // *Український журнал інформаційних технологій*. 2020. Т.2. N 1– с. 66-72
71. Giancristofaro D., Giubilei R., Novello R., Piloni V., Touth J. Performances of Novel DVB-RCS Standard Turbo Code and its Use in On-Board Processing Satellites // *Pro- ceedings of the EMPS workshop, in IEEE EMPS/PIMRC.* – London, 17-21 September 2000. – P. 345-349.
72. Кларк Дж.-мл., Кейн Дж. Кодирование с исправлением ошибок в системах цифровой связи: Пер. с англ. / Под ред. Б.С. Цыбакова. – М.: Радио и

связь, 1987. – 392 с.

73. Кушнір О.І., Тимочко О.І., Сєверінов О.В. Аналіз методів завадостійкого кодування у цифрових системах зв'язку. - Системи обробки інформації. - 2007. - № 9(67). - с. 63-65.

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

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

76. Звіт НДР шифр "Розвиток - 3". - К. КВІРТУ ППО. - 1989., у відкритому доступі відсутня

77. 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, P.1121-1127 .

78. Животовський Р.М., Петрук С.М. Аналіз потенційних можливостей засобів радіоелектронної боротьби збройних сил російської федерації щодо подавлення каналів безпілотних авіаційних комплексів. - /Доповіді та тези доповідей - 25 листопада 2016 року.- К. ВІПІ. - 2016. - с, 92.

79. Клейнрок Л. Комунікаційні мережі (стохастичні потоки і затримки повідомлень): Пер. з англ. М .: Наука, 1970. 256 с.

80. Клейнрок Л. Обчислювальні системи з чергами: Пер. з англ. / Под ред. Б.С. Цибакова. М .: Світ, 1979. 600 с.

81. Рашевський П.К. Ріманова геометрія і тензорний аналіз. М .: Наука, 1964. 664 с.

82. Схоутен Я.А. Тензорний аналіз для фізиків: Пер. з англ. / Под ред. І.В. Кеппена. М .: Наука, 1965. 456 с.

83. Борисенко О.І., Тарапов І.Є. Векторний аналіз та початку тензорного

обчислення. М .: Вища школа, 1966. 252 с.

84. Векуа І.М. Основи тензорного аналізу і теорія коваріантів. М .: Наука, 1978. 296 с.

85. Победря Б.Є. Лекції по тензорного аналізу. М .: Изд-во Моск. ун-ту, 1979. 214 с.

86. Коренєв Г.В. Тензорне числення: Учеб. посібник для вузів. М .: Изд-во МФТІ, 2000. 240 с.

87. Дімітрієнко Ю.І. Тензорне числення: Учеб. посібник для вузів. М .: Вища школа, 2001. 575 с.

88. Шварц М. Мережі зв'язку: протоколи, моделювання та аналіз. У 2 ч .: Пер. з англ. М .: Наука, Гл. ред. фіз-мат. лит., 1992. Ч. 1. 336 с.

89. Бертсекас Д., Галлагер Р. Мережі передачі даних: Пер. з англ. М .: Світ, 1989. 544 с.

90. Рад Б.Я., Яковлев С.А. Побудова мереж інтегрального обслуговування. Л .: Машіностроєня, 1990. 332 с.

91. Дейвіс Б.Х., Дейвіс Т.Р. Застосування методів комутації пакетів в тактичних радіомережах // ТШЕР. 1987. Т. 75, No 1. С. 53 - 68.

92. Клейнрок Л., Сильвестр Дж. Методи багаторазового використання простору в многопрольотних пакетних радіомережах // ТШЕР. 1987. Т. 75, No 1. С. 187 - 200.

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

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

95. 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.

96. 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.

97. 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.

98. 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.

## ДОДАТОК А

Копії документів підготовки дисертаційної роботи здобувача періоду  
КВІРТУ ППО ( м. Київ 1989 р.)

НАЧАЛЬНИКУ КАФЕДРЫ № 59

## РАПОРТ

Прошу Вашего ходатайства о прикреплении меня на каф. № 59 соискателем для сдачи кандидатского экзамена по специальности и написании кандидатской диссертации. Необходимые документы прилагаю.

Начальник отделения кафедры № 59

капитан



-С.Перепелицын-

"14" апреля 1989 г.

*зачестьтатом какалькека уселенца  
по учебной и научной работе.  
ходатайствую по существу рапорта.*

*Начальник кафедры № 59  
полковник И Заруднев = И. Заруднев =*

14.04.89г.

*Уч. секр Солов*

*У. Ч  
И. Ч  
11.05.89*

*Нач. ППО*

*Разрешено Криво  
одобрить учт. материал.*

*Начальнику учреждения*

*Ходатайство  
о приеме в члены на  
совет учреждения*

*Заруднев*

## ВЫ П И С К А

из протокола № заседания кафедры № 59  
от 14.09 1989 года.

ПОВЕСТКА ДНЯ : 1. Рассмотрение темы диссертационной работы капитана Перепелицына С.А. .

Постановили : 1. Диссертационную работу по теме " СИНТЕЗ И АНАЛИЗ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИХ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ ФИЛЬТРОВ В УСЛОВИЯХ ШИРОКОПОЛОСНЫХ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПОМЕХ " капитана Перепелицына С.А. одобрить .

2. Ходатайствовать перед командованием училища о включении капитана Перепелицына С.А. в списки соискателей для написания диссертационной работы .

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ СОБРАНИЯ

м-р  - Б. Зинчук -

СЕКРЕТАРЬ

к-н  - А. Сергиенко -



## СПИСОК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

капитана Перепелицына С.А., начальника  
отделения лаборатории кафедры № 59 .

## I. Заявки на изобретения :

1. Помехоустойчивая РЛС со сложными сигналами.  
Заявка на изобретение № 3215136 от 15.03.88г.  
Положительное решение № Р-321 от 14.09.88г.
2. Автокомпенсатор помех по боковым лепесткам .  
Заявка на изобретение № 3215873 от 16.04.88г. с приор. .  
положительное решение № Р-688 от 15.10.88г.
3. Самолетный радиовысотомер с шумовыми сигналами.  
Заявка на изобретение № 3218128 от 22.07.88г. с приор. .
4. Самолетный цифровой радиовысотомер .  
Заявка на изобретение № 3218910 от 05.09.88г.
5. РЛС внешнетраекторных измерений .  
Заявка на изобретение № 3219911 от 05.01.89г. с приор. .

## 2. Доклады .

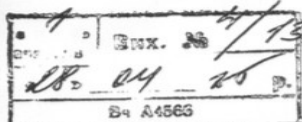
1. Синтез и анализ многоканальных автокомпенсаторов помех на основе методов марковской теории нелинейной фильтрации  
г. Тула 03-04.02.89г.
2. Повышение скрытности РЛС на основе использования свойств динамических антенн .  
г. Тула 03-04.02.89г.
3. Отчет по НИР "Развитие-3" . § 3.6 Разработка и испытание системы формирования широкополосных сигналов .Ст.98-103
4. Итоговый отчет по НИР "Развитие-3" . § 4.2.2 Результаты испытаний системы помехозащиты . Стр.125-138 .



## ДОДАТОК Б

Копії документів по фізичній моделі (робочого прототипу) цифрової  
радіостанції PRR.

Відповідь ЦНДІ ОБТ ЗСУ



Голові правління громадської організації  
«Асоціації захисту офіцерів військової  
розвідки»  
ПЕРЕПЕЛЩИНУ С.О.  
вул. Мельникова, 81, м. Київ 04050

Щодо радіостанції  
тактичної ланки

Шановний Сергію Олександровичу!

Повідомляємо Вас, що у Центральному науково-дослідному інституті озброєння та військової техніки Збройних Сил України розглянуто надіслані Вами пропозиції щодо розробки персональної радіостанції тактичної ланки управління.

Зазначені радіостанції тактичної ланки управління є перспективними та представляють собою теоретичний та практичний інтерес під час забезпечення зв'язку для потреб Збройних Сил України.

Особливої уваги заслуговує програмована архітектура виконання зазначених радіозасобів, що дозволяє програмним шляхом виконувати заміну ключів шифрування, алгоритмів маршрутизації, режимів роботи тощо.

Проте позитивне рішення на відкриття ДКР та розробку тактико-технічного завдання на ДКР може бути прийнято лише після обґрунтування фахівцями Головного управління зв'язку та інформаційних систем Генерального штабу Збройних Сил України (як споживача) оперативного-тактичних вимог на радіостанцію тактичної ланки управління.

Про Ваше звернення Головне управління зв'язку та інформаційних систем Генерального штабу Збройних Сил України нами проінформовано.

З повагою

Начальник Центрального науково-дослідного інституту  
озброєння та військової техніки Збройних Сил України  
полковник

І.Б. ЧЕПКОВ

Лист начальнику ГШ ЗСУ

# АЗОВР

Україна

Громадська організація "АЗОВР"  
04050, м. Київ, вул. Мельникова, 81,  
моб. +380 67 441 57 92,  
Код ЗКПО 26500800

Адреса для листів:  
02095, Київ-95, вул. Срібнокільська, буд.22,кв.91

Вих. № 0402/1 від 04 лютого 2016 року.

*НГУЗіС  
- оцінювальні  
- розробка системи  
до "АЗОВР" пропонує розробку нової архітектури інформаційної системи військового зв'язку та управління на базі сучасних технологій (військові інформаційні самоналагоджувальні мережі працюють в частотному діапазоні 70 - 90 ГГц). Вона призначена для забезпечення опорної мережі зв'язку в зоні відповідальності оперативного рівня ЗСУ до рівня батальйону (роті) і окремих груп (аналог системи зв'язку WIN-T ЗС США).*

Начальнику Генерального штабу  
Головнокомандувачу Збройних Сил України  
Муженко Віктору Миколайовичу

ГО "АЗОВР" пропонує розробку нової архітектури інформаційної системи військового зв'язку та управління на базі сучасних технологій (військові інформаційні самоналагоджувальні мережі працюють в частотному діапазоні 70 - 90 ГГц). Вона призначена для забезпечення опорної мережі зв'язку в зоні відповідальності оперативного рівня ЗСУ до рівня батальйону (роті) і окремих груп (аналог системи зв'язку WIN-T ЗС США).

Запропонована система зв'язку та управління складається з обладнання і вузлів двох рівнів: *нижній рівень* - радіостанція тактичного рівня із закритим каналом зв'язку (рація з кнопковою тангентою, підсумок, виносні антени, гарнітура, виносна радіокнопка, пристрій швидкого перепрограмування рацій і зміни кодів шифрування - один на 10 комплектів); *верхній рівень* - обладнання опорної самоналагоджувальної (у форматі протоколу IPv6) мережі зв'язку і управління (модернізовані сучасні стаціонарні релейні станції (устаткування радіодоступу) частотного діапазону 70/80/90 ГГц. *При розробці та виготовленні зразків антенних систем типу ФАР (система авто електромеханічного сканування) - параметри і можливості даної системи зростають багаторазово.*

Фахівці громадської організації розробили і виготовили робочі зразки радіостанцій тактичної ланки - першого рівня (PRR використовує передові технології з використанням модуляції розширення спектра на частоті 2.4 ГГц, псевдовипадкового тимчасового розділення каналів і OFDM, криптоалгоритмом захисту кожного сеансу зв'язку) - для потреб спецпідрозділів армії, СБУ і національної гвардії України.

Реалізувати основний функціонал існуючих станцій тактичної ланки не виявляється проблематичним. Основні властивості - відносна скритність, захист переданого мовного сигналу або інформації, оперативна зміна ключів по бездротовому інтерфейсу, одночасна передача голосу і даних, бездротова кнопка РТТ, портативність.

Розробка радіостанції та програмного забезпечення (ПЗ) для її функціонування потребує значного фінансування, яке потрібно для розробки повного технологічного циклу. Ми за власний кошт виконали конструкторські роботи обладнання першого рівня, розробили та узгодили ТЗ з відповідними державними установами.

Нам потрібна будь-яка фінансова допомога для виконання наступних етапів роботи:

**Перший етап: - Радіостанція тактичного рівня із закритим каналом зв'язку (PRR)**

- розробка та оздоблення випробувального стенду та КВА - від 423 700 гривень (16 270\$ USA);
- виготовлення працюючих зразків для випробувань на отримання сертифікату відповідності обладнання першого рівня (розробка документації випробувань, оплата послуг акредитованного органу по сертифікації) - 187 100 гривень (7 060\$ USA);
- отримання сертифікату криптоалгоритму (розробка документації випробувань, оплата

- послуг акредитованого органу по сертифікації) - 244 860 гривень (9 240\$ USA);
- військові випробування (виготовлення та налагодження партії устаткування, розробка програми випробувань, узгодження документації, відрядження та транспортні витрати) - від 248 040 гривень (9 360\$ USA);

**Другий етап: - Елементи опорної мережі зв'язку і управління**

- виготовлення працюючих зразків для випробувань на отримання сертифікату відповідності обладнання опорної мережі зв'язку (розробка та виготовлення робочих зразків обладнання опорної мережі, закупівля зразків обладнання частотного діапазону 72-86 ГГц; розробка документації випробувань, оплата послуг акредитованого органу по сертифікації) - 2 507 430 гривень (94 620\$ USA);
- *розробка технології та виготовлення зразків (двох) антенних систем типу ФАР (система авто електромеханічного сканування) обладнання частотного діапазону 72-86 ГГц* - 12 316 670 грн (464 780 \$ USA) ;
- розробка та сертифікація ПЗ системи самоналагоджувальної опорної мережі зв'язку військового рівня - від 550 000 \$ USA - за потреби;
- військові випробування обладнання опорної мережі зв'язку (виготовлення та налагодження партії устаткування, розробка програми випробувань, узгодження документації, відрядження та транспортні витрати) - від 414 080 гривень (15 336\$ USA);
- витрати на оформлення патентів - від 294 300 гривень (10 900\$ USA);

Запуск виробництва передбачається організувати на технологічних циклах вітчизняних компаній (за наявності необхідних технологічних можливостей) або, як варіант, німецької компанії Phoenix Contact, що гарантує високу якість і швидку сертифікацію MIL-STD-810.

Представляється правильним одночасно реалізувати кілька варіантів для різних діапазонів частот, різними мережевими протоколами, але під один корпус. Зазначений підхід не вимагає особливого збільшення витрат, але дозволить вибрати оптимальний варіант для різних способів застосування.

З повагою, Голова Правління

ГО «Асоціація захисту офіцерів військової розвідки»



С. Перепеліцин

Фото фізичної моделі (робочого прототипу) цифрової радіостанції PRR.





## ДОДАТОК В

## Авторські свідоцтва СРСР на винаходи

*Зі свід. ст.*



СОЮЗ СОВЕТСКИХ СОЦИАЛИСТИЧЕСКИХ РЕСПУБЛИК  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ ПО ИЗОБРЕТЕНИЯМ И ОТКРЫТИЯМ  
ПРИ ГОСУДАРСТВЕННОМ КОМИТЕТЕ СССР ПО НАУКЕ И ТЕХНИКЕ  
(ГОСКОМИЗОБРЕТЕНИЙ)

**АВТОРСКОЕ СВИДЕТЕЛЬСТВО**  
№ 300902

На основании полномочий, предоставленных Правительством СССР, Госкомизобретений выдал настоящее авторское свидетельство на изобретение:

Автор (авторы): *и-р* Зинчук Борис Евгеньевич  
Костромин Михаил Иванович  
Перепелицын Сергей Александрович  
Скобликов Сергей Сергеевич  
Киричко Олег Викторович

Заявитель:

Заявка № 4502284 Приоритет изобретения 18 ноября 1988 г.  
Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений СССР

1 сентября 1989 г.  
Действие авторского свидетельства распространяется на всю территорию Союза ССР.



Председатель Комитета

Начальник отдела





12/317



СОЮЗ СОВЕТСКИХ СОЦИАЛИСТИЧЕСКИХ РЕСПУБЛИК  
 ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ ПО ИЗОБРЕТЕНИЯМ И ОТКРЫТИЯМ  
 ПРИ ГОСУДАРСТВЕННОМ КОМИТЕТЕ СССР ПО НАУКЕ И ТЕХНИКЕ  
 (ГОСКОМИЗОБРЕТЕНИЙ)

## АВТОРСКОЕ СВИДЕТЕЛЬСТВО

№ 310427

На основании полномочий, предоставленных Правительством СССР, Госкомизобретений выдал настоящее авторское свидетельство на изобретение:

Автор (авторы): Зинчук Борис Евгеньевич  
 Скобликов Сергей Сергеевич  
 Киричко Олег Викторович  
 Перепелицын Сергей Александрович

Заявитель:

Заявка № 4514923 Приоритет изобретения 22 мая 1989г.  
 Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений СССР

1 марта 1990г.

Действие авторского свидетельства распространяется на всю территорию Союза ССР.



Председатель Комитета

Начальник отдела

*Ю. В. Селин*  
*Зинчук*



12/245

26



СОЮЗ СОВЕТСКИХ СОЦИАЛИСТИЧЕСКИХ РЕСПУБЛИК  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ ПО ИЗОБРЕТЕНИЯМ И ОТКРЫТИЯМ  
ПРИ ГОСУДАРСТВЕННОМ КОМИТЕТЕ ССРС ПО НАУКЕ И ТЕХНИКЕ  
(ГОСКОМИЗОБРЕТЕНИЙ)

**АВТОРСКОЕ СВИДЕТЕЛЬСТВО**  
№ 308882

На основании полномочий, предоставленных Правительством СССР, Госкомизобретений выдал настоящее авторское свидетельство на изобретение:

Автор (авторы): Зинчук Борис Евгеньевич  
Киричко Олег Викторович  
Скобликов Сергей Сергеевич  
Зиневич Виктор Михайлович  
Перепелицын Сергей Александрович

Заявитель: Киевское высшее инженерное радиотехническое училище противовоздушной обороны

Заявка № 4512753 Приоритет изобретения 14 апреля 1989г.  
Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений СССР  
1 февраля 1990г.  
Действие авторского свидетельства распространяется на всю территорию Союза ССР.



Председатель Комитета

Начальник отдела

*Ю. Зинчук*  
*Зинчук*





СОЮЗ СОВЕТСКИХ СОЦИАЛИСТИЧЕСКИХ РЕСПУБЛИК  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ ПО ИЗОБРЕТЕНИЯМ И ОТКРЫТИЯМ  
ПРИ ГОСУДАРСТВЕННОМ КОМИТЕТЕ СССР ПО НАУКЕ И ТЕХНИКЕ  
(ГОСКОМИЗОБРЕТЕНИЙ)

## АВТОРСКОЕ СВИДЕТЕЛЬСТВО

№

301632

На основании полномочий, предоставленных Правительством СССР, Госкомизобретений выдал настоящее авторское свидетельство на изобретение:

Автор (авторы): Зинчук Борис Евгеньевич  
Диковченко Валентин Григорьевич  
Стрелковский Олег Георгиевич  
Скобlikов Сергей Сергеевич  
Перепелицын Сергей Александрович

Заявитель:

Заявка № 3199706 Приоритет изобретения 13 мая 1988г.

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений СССР

2 октября 1989г.

Действие авторского свидетельства распространяется на всю территорию Союза ССР.



Председатель Комитета

*[Handwritten signature]*

Начальник отдела

*[Handwritten signature]*



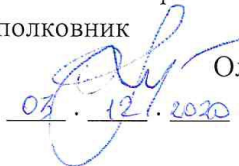
## ДОДАТОК Г

### Акти про впровадження результатів дисертаційного дослідження.

ПОГОДЖЕНО

Заступник начальника Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка з навчальної роботи

полковник

  
03.12.2020

Олег ПРОХОРОВ

ЗАТВЕРДЖУЮ

Начальник Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка

генерал-майор



Ігор ТОЛОК

### АКТ

**про впровадження результатів дисертаційного дослідження на тему  
“ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ МОДЕЛЮВАННЯ РАДІОМЕРЕЖІ, ЩО САМО  
НАЛАГОДЖУЄТЬСЯ, НА ОСНОВІ МЕТОДІВ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ”**

Комісія в складі: голова – начальник навчального відділу Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка полковник КУДРЯВЦЕВ О.А.; члени комісії – заступник начальника військового факультету фінансів і права з навчальної та наукової роботи підполковник ПІГОЛЬ Ю.М., начальник кафедри геоінформаційних систем військового факультету фінансів та права, кандидат технічних наук, доцент полковник САВКОВ П.А., доцент кафедри геоінформаційних систем військового факультету фінансів та права підполковник ПИСАРЕНКО Р.В., – склала цей акт про те, що результати дисертаційного дослідження на тему “ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ МОДЕЛЮВАННЯ РАДІОМЕРЕЖІ, ЩО САМО НАЛАГОДЖУЄТЬСЯ, НА ОСНОВІ МЕТОДІВ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ” впроваджені в навчальну дисципліну «Геопросторова розвідка», а саме:

запропонована математична модель автоматизованої обробки даних стану елементів радіомережі з урахуванням просторового розташування;

здійснена апробація моделювання топології радіомережі за допомогою геоінформаційної системи ArcGIS Desktop.

Результати також можуть бути використані при викладанні інших дисциплін з геоінформаційних систем та інформаційних технологій за спеціальністю 193 Геодезія та землеустрій.

Голова комісії:

полковник



Олександр КУДРЯВЦЕВ

Члени комісії:

підполковник



Юрій ПІГОЛЬ

полковник



Павло САВКОВ

підполковник



Роман ПИСАРЕНКО

03 . 12 . 2020р.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Генеральний директор  
ТОВ «ЕСОММ Со»

Микола Мазуренко

## АКТ

**про впровадження результатів дисертаційного дослідження на тему  
“ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ МОДЕЛЮВАННЯ РАДІОМЕРЕЖІ, ЩО САМО  
НАЛАГОДЖУЄТЬСЯ, НА ОСНОВІ МЕТОДІВ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ”**

Комісія в складі: голова – заступник генерального директора ТОВ «ЕСОММ Со» із геоінформаційних систем ПРИЩЕПА С.В.; члени комісії – начальник відділу геопросторових даних та територіального планування ТОВ «ЕСОММ Со» МАЛЬЦЕВ С.В., начальник відділу технічної підтримки ТОВ «ЕСОММ Со» кандидат військових наук, СНС ФЕДЧЕНКО О.П., – склала цей акт про те, що результати дисертаційного дослідження на тему “ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ МОДЕЛЮВАННЯ РАДІОМЕРЕЖІ, ЩО САМО НАЛАГОДЖУЄТЬСЯ, НА ОСНОВІ МЕТОДІВ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ” використовувалися при розробці базових задач макету підсистеми геоінформаційної підтримки ДКР «Гіацинт», а саме:

математична модель автоматизованої обробки даних стану елементів радіомережі з урахуванням просторового розташування на висотній матриці SRTM;

моделювання топології радіомережі за допомогою геоінформаційної системи ArcGIS Pro.

Голова комісії:

Сергій ПРИЩЕПА

Члени комісії:

Сергій МАЛЬЦЕВ

Олексій ФЕДЧЕНКО

09 . 12 . 2020р.

## ДОДАТОК Д

## Програмна реалізація ітераційного методу градієнтного пошуку.

```
clc, close all
letter1 = [0 0 1 0 0 ...
           0 1 0 1 0 ...
           0 1 0 1 0 ...
           1 0 0 0 1 ...
           1 1 1 1 1 ...
           1 0 0 0 1 ...
           1 0 0 0 1]';

letter2 = [1 1 1 1 0 ...
           1 0 0 0 1 ...
           1 0 0 0 1 ...
           1 1 1 1 0 ...
           1 0 0 0 1 ...
           1 0 0 0 1 ...
           1 1 1 1 0]';

letter3 = [0 1 1 1 0 ...
           1 0 0 0 1 ...
           1 0 0 0 0 ...
           1 0 0 0 0 ...
           1 0 0 0 0 ...
           1 0 0 0 1 ...
           0 1 1 1 0]';

letter4 = [1 1 1 1 0 ...
           1 0 0 0 1 ...
           1 0 0 0 1 ...
           1 0 0 0 1 ...
           1 0 0 0 1 ...
           1 0 0 0 1 ...
           1 1 1 1 0]';

letter5 = [1 1 1 1 1 ...
           1 0 0 0 0 ...
           1 0 0 0 0 ...
           1 1 1 1 0 ...
           1 0 0 0 0 ...
           1 0 0 0 0 ...
           1 1 1 1 1]';

letter6 = [1 1 1 1 1 ...
           1 0 0 0 0 ...
           1 0 0 0 0 ...
           1 1 1 1 0 ...
           1 0 0 0 0 ...
           1 0 0 0 0 ...
           1 0 0 0 0]';

letter7 = [0 1 1 1 0 ...
           1 0 0 0 1 ...
           1 0 0 0 0 ...
           1 0 0 0 0 ...
           1 0 0 1 1 ...
           1 0 0 0 1 ...
           0 1 1 1 0]';

letter8 = [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]';
```

```

letter9 = [0 0 1 0 0 ...
           0 0 1 0 0 ...
           0 0 1 0 0 ...
           0 0 1 0 0 ...
           0 0 1 0 0 ...
           0 0 1 0 0 ...
           0 0 1 0 0]';

```

```

letter10 = [0 0 1 0 0 ...
            0 0 1 0 0 ...
            0 0 1 0 0 ...
            0 0 1 0 0 ...
            0 0 1 0 0 ...
            1 0 1 0 0 ...
            1 1 1 0 0]';

```

```

letter11 = [1 0 0 0 1 ...
            1 0 0 1 0 ...
            1 0 1 0 0 ...
            1 1 0 0 0 ...
            1 0 1 0 0 ...
            1 0 0 1 0 ...
            1 0 0 0 1]';

```

```

letter12 = [1 0 0 0 0 ...
            1 0 0 0 0 ...
            1 0 0 0 0 ...
            1 0 0 0 0 ...
            1 0 0 0 0 ...
            1 0 0 0 0 ...
            1 1 1 1 1]';

```

```

letter13 = [1 0 0 0 1 ...
            1 1 0 1 1 ...
            1 0 1 0 1 ...
            1 0 1 0 1 ...
            1 0 0 0 1 ...
            1 0 0 0 1 ...
            1 0 0 0 1]';

```

```

letter14 = [1 0 0 0 1 ...
            1 0 0 0 1 ...
            1 1 0 0 1 ...
            1 0 1 0 1 ...
            1 0 0 1 1 ...
            1 0 0 0 1 ...
            1 0 0 0 1]';

```

```

letter15 = [0 1 1 1 0 ...
            1 0 0 0 1 ...
            1 0 0 0 1 ...
            1 0 0 0 1 ...
            1 0 0 0 1 ...
            1 0 0 0 1 ...
            0 1 1 1 0]';

```

```

letter16 = [1 1 1 1 0 ...
            1 0 0 0 1 ...
            1 0 0 0 1 ...
            1 1 1 1 0 ...
            1 0 0 0 0 ...
            1 0 0 0 0 ...

```

```

        1 0 0 0 0]';

letter17 = [0 1 1 1 0 ...
            1 0 0 0 1 ...
            1 0 0 0 1 ...
            1 0 0 0 1 ...
            1 0 1 0 1 ...
            1 0 0 1 1 ...
            0 1 1 1 1]';

letter18 = [1 1 1 1 0 ...
            1 0 0 0 1 ...
            1 0 0 0 1 ...
            1 1 1 1 0 ...
            1 0 1 0 0 ...
            1 0 0 1 0 ...
            1 0 0 0 1]';

letter19= [0 1 1 1 0 ...
            1 0 0 0 1 ...
            0 1 0 0 0 ...
            0 0 1 0 0 ...
            0 0 0 1 0 ...
            1 0 0 0 1 ...
            0 1 1 1 0]';

letter20 = [1 1 1 1 1 ...
            1 0 1 0 1 ...
            0 0 1 0 0 ...
            0 0 1 0 0 ...
            0 0 1 0 0 ...
            0 0 1 0 0 ...
            0 1 1 1 0]';

letter21 = [1 0 0 0 1 ...
            1 0 0 0 1 ...
            1 0 0 0 1 ...
            1 0 0 0 1 ...
            1 0 0 0 1 ...
            1 0 0 0 1 ...
            1 1 1 1 1]';

letter22 = [1 0 0 0 1 ...
            1 0 0 0 1 ...
            1 0 0 0 1 ...
            0 1 0 1 0 ...
            0 1 0 1 0 ...
            0 1 0 1 0 ...
            0 0 1 0 0]';

letter23 = [1 0 0 0 1 ...
            1 0 0 0 1 ...
            1 0 0 0 1 ...
            1 0 1 0 1 ...
            1 0 1 0 1 ...
            1 1 0 1 1 ...
            1 0 0 0 1]';

letter24 = [1 0 0 0 1 ...
            1 0 0 0 1 ...
            0 1 0 1 0 ...
            0 0 1 0 0 ...
            0 1 0 1 0 ...
            1 0 0 0 1 ...

```





```

net1 = newff(alphabet,Tn,[33 27],{'tansig' 'tansig' 'tansig'});
net1.trainFcn = 'trainlm';
%net1.trainFcn = 'traingd';
net1.divideFcn = ''; % 3
net1.trainParam.epochs = 555000;
net1.trainParam.goal = 3e-5; %
[net1,tr] = train(net1,alphabet, targets); %
view(net1);

%y = sim(net1,letter1);

figure (4)
y=sim(net1, ALPHABETn(:,1));
answer = find(compet(y) == 1);
display(answer)
%plotchar(alphabet(:,answer));
subplot(1,5,1), plotchar(alphabet(:,answer));
y=sim(net1, ALPHABETn(:,12));
answer = find(compet(y) == 1);
display(answer)
subplot(1,5,2), plotchar(alphabet(:,answer));
y=sim(net1, ALPHABETn(:,1));
answer = find(compet(y) == 1);
display(answer)
subplot(1,5,3), plotchar(alphabet(:,answer));
y=sim(net1, ALPHABETn(:,18));
answer = find(compet(y) == 1);
display(answer)
subplot(1,5,4), plotchar(alphabet(:,answer));
y=sim(net1, ALPHABETn(:,13));
answer = find(compet(y) == 1);
display(answer)
subplot(1,5,5), plotchar(alphabet(:,answer));
y=sim(net1, ALPHABETn(:,18));
answer = find(compet(y) == 1);
display(answer)
%subplot(1,8,6), plotchar(alphabet(:,answer));
%y=sim(net1, ALPHABETn(:,12));
%answer = find(compet(y) == 1);
%display(answer)
%subplot(1,8,7), plotchar(alphabet(:,answer));
%y=sim(net1, ALPHABETn(:,4));
%answer = find(compet(y) == 1);
%display(answer)
%subplot(1,8,8), plotchar(alphabet(:,answer));

%y = sim(net1,ALPHABETn(:,9));
%answer = find(compet(y) == 1);
%figure (5)
%plotchar(alphabet(:,answer));
%display(answer)

function plotchar(c)
%PLOTCHAR Plot a 35 element vector as a 5x7 grid.
%
% PLOTCHAR(C)
% C - a 35 element vector.
% C's elements are plotted as a 5x7 grid.

```



```
% Mark Beale, 12-15-93
% Copyright 1992-2002 The MathWorks, Inc.
% $Revision: 1.11 $ $Date: 2002/04/14 21:23:48 $

% DEFINE BOX
x1 = [-0.3 -0.3 +0.3 +0.3 -0.3];
y1 = [-0.3 +0.3 +0.3 -0.3 -0.3];

% DEFINE BOX WITH X
x2 = [x1 +0.3 +0.3 -0.3];
y2 = [y1 +0.3 -0.3 +0.3];

newplot;
plot(x1*5.6+2.5,y1*7.6+3.5,'w');
%axis([-1.5 6.5 -0.5 7.5]);
axis('equal')
axis off
hold on

for i=1:length(c)
    x = rem(i-1,5)+.3;
    y = 6-floor((i-1)/5)+.3;
    plot(x2*c(i)+x,y2*c(i)+y,'k','LineWidth',3);
end
hold off
end
```

## ДОДАТОК Е

### Топологія — моделювання та методика евристичного аналізу.

#### *Топологія з конфігурацією у формі коло.*

Варіант №1, при якому максимальна дальність зв'язку між вузлами мережі V2-V5 (ребро X12) відповідає дальності зв'язку окремого вузла. Потужність передавача і чутливість приймача дозволяють встановити гарантований зв'язок і забезпечують гарантовану передачу пакетів інформації без втрат між усіма абонентами мережевої групи. Найдальший абонент групи може встановити прямий зв'язок з будь-яким іншим абонентом групи (V1-V10). Матриця інцидентності для такого варіанту представлена в табл.15

Варіант №2, при якому дальність зв'язку мережі між окремими вузлами в три рази зменшиться. Потужність передавача і чутливість приймача дозволяють встановити гарантований зв'язок і забезпечують гарантовану передачу пакетів інформації без втрат між абонентами мережевої групи: цим вимогам задовольняють групи V1-V2, V4, V6, V7, V8, V9, V10 або V5-V3, V4, V6, V9 - рис. 4.2. Матриця інцидентності цього варіанту представлена в табл. 16

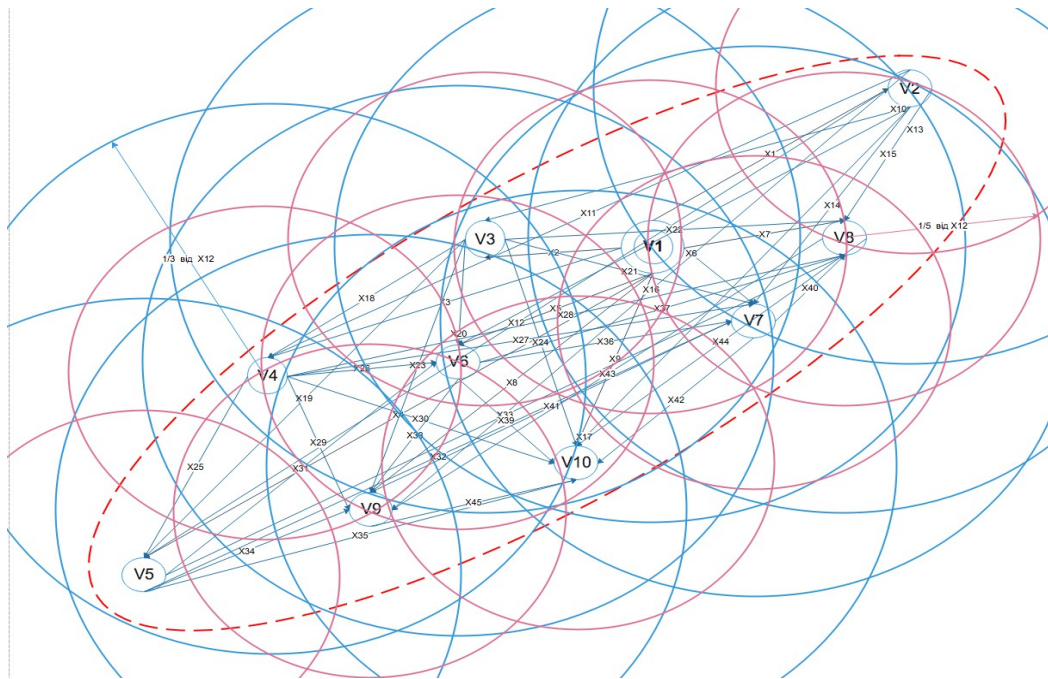


Рис. 4.2 Структура радіомережі з 10 абонентами (вузлами) з конфігурацією у формі коло.

Варіант №3, при якому дальність зв'язку мережі між окремими вузлами зменшиться в п'ять разів. Встановити гарантований зв'язок і забезпечують гарантовану передачу пакетів інформації без втрат між абонентами мережевої групи: цим вимогам задовольняють групи V1-V2, V3, V6, V7, V8; V6-V1, V7, V9, V10 і V9-V5. Матриця інцидентності для такого варіанту представлена в табл. 17.

***Топологія з конфігурацією у формі еліпс.***

Варіант №4, при якому дальність зв'язку мережі між окремими вузлами в три рази зменшиться. Потужність передавача і чутливість приймача дозволяють встановити гарантовану зв'язок і забезпечують гарантований передачу пакетів інформації без втрат між абонентами мережевої групи: цим вимогам задовольняють групи V1-V2, V3, V4V5, V6, V7, V8, V9, V10. Матриця інцидентності для такого варіанту представлена в табл. 18.

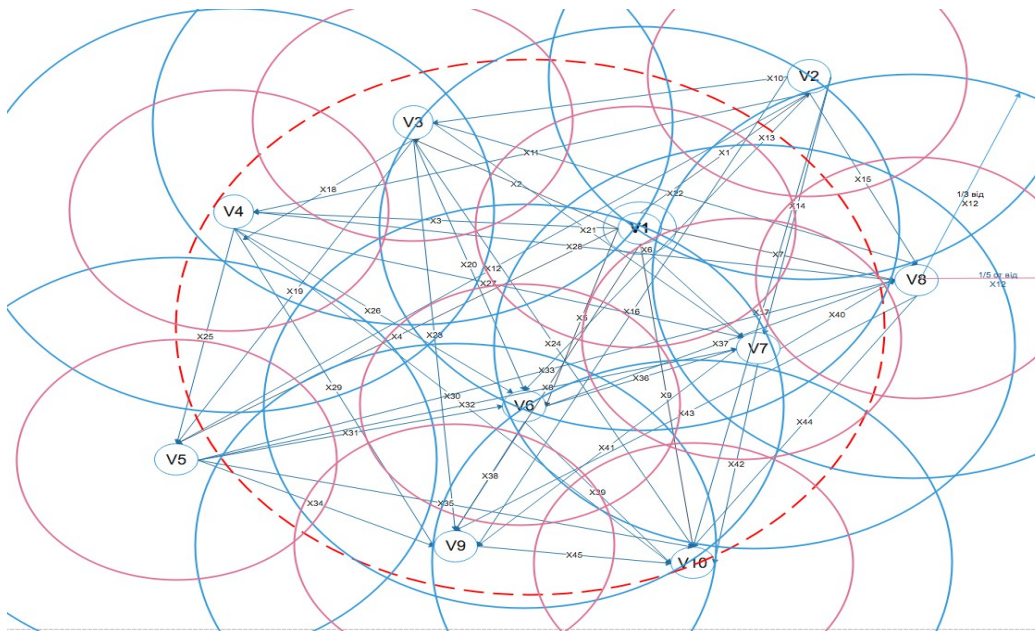


Рис. 4.3 Структура радіомережі з 10 абонентами (вузлами) з еліпсоїдної конфігурації.

Варіант №5, при якому дальність зв'язку мережі між окремими вузлами в п'ять разів зменшиться. Потужність передавача і чутливість приймача дозволяють встановити гарантований зв'язок і забезпечують гарантовану передачу пакетів інформації без втрат між абонентами мережевої групи: цим вимогам

задовольняють групи V1-V3, V7, V8; V6 -V3, V4, V9, V10 і V2-V8. Матриця інцидентності для такого варіанту представлена в табл. 19

Варіант №6, при якому дальність зв'язку між вузлами мережі у дванадцять разів зменшиться. Потужність передавача і чутливість приймача дозволяють встановити гарантований зв'язок і забезпечують гарантовану передачу пакетів інформації без втрат між абонентами мережевої групи: цим вимогам задовольняють групи V1-V7; V3-V6 і V7-V8. Матриця інцидентності для такого варіанту представлена в табл. 20.

***Топологія з конфігурацією у формі лінії зіткнення з противником.***

Варіант №7, при якому дальність зв'язку мережі між окремими вузлами в три рази зменшиться. Потужність передавача і чутливість приймача дозволяють встановити гарантований зв'язок і забезпечують гарантовану передачу пакетів інформації без втрат між абонентами мережевої групи: цим вимогам задовольняють групи V1-V2, V3, V10, V9, V8, V7, V6, V5 V4-V5, V6, V7, V8, V9, V10. Матриця інцидентності для такого варіанту представлена в табл. 21.

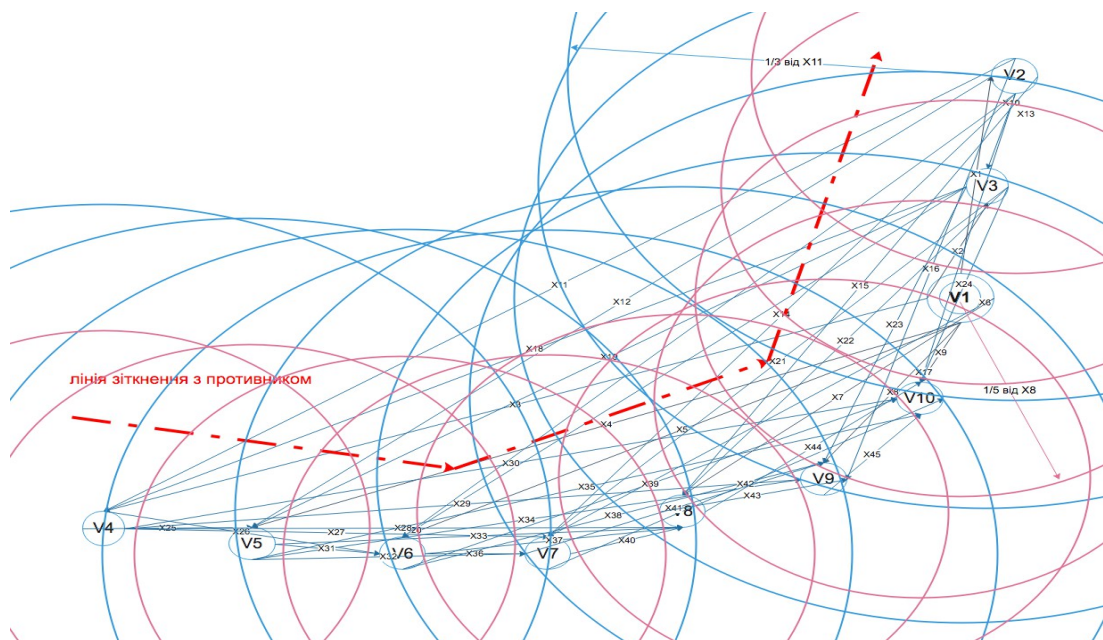


Рис. 4.4 Структура радіомережі з 10 абонентами (вузлами) з конфігурацією у формі лінії зіткнення.

Варіант №8, при якому дальність зв'язку мережі між окремими вузлами в



п'ять разів зменшиться. Потужність передавача і чутливість приймача дозволяють встановити зв'язок і забезпечують гарантовану передачу пакетів інформації без втрат між абонентами мережевої групи: цим вимогам задовольняють групи V1-V2, V3, V10, V9, V8, V7; V4-V5, V6. Матриця інцидентності для такого варіанту представлена в табл. 22

**Аналіз завадостійкості мобільної радіомережі конфігурації на місцевості у формі коло в залежності від кількості абонентів (вузлів).**

Варіант №9, при якому максимальна дальність зв'язку між окремими вузлами (п'ять) радіомережі в три рази зменшиться. Потужність передавача і чутливість приймача дозволяють встановити гарантований зв'язок і забезпечують гарантовану передачу пакетів інформації без втрат між абонентами мережевої групи: цим вимогам задовольняє група V1-V2, V3, V5. Матриця інцидентності для такого варіанту представлена в табл. 23.

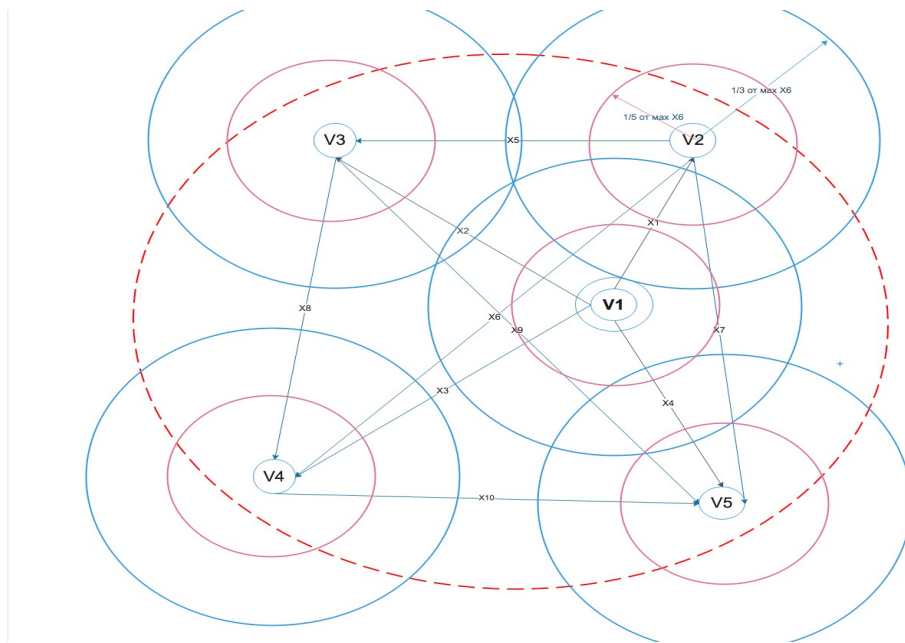


Рис. 4.6 Структура радіомережі з п'ятьма абонентами (вузлами) й зони покриття в залежності і дальності зв'язку між вузлами

При відсутності впливу активних перешкод, прямий зв'язок можливий для чотирьох абонентів групи без режиму ретрансляції комунікатора (крім вузла

V4).

Варіант №10, при якому максимальна дальність зв'язку між окремими вузлами мережі в п'ять разів зменшиться. Потужність передавача і чутливість приймача дозволяють встановити гарантований зв'язок і забезпечують гарантовану передачу пакетів інформації без втрат між абонентами мережевої групи: цим вимогам не задовольняє жодна група вузлів. Матриця інцидентності для такого варіанту представлена в табл. 24.

Перешкодостійкість мобільної однорангової радіомережі, конфігурація якої на місцевості наближена до форми **кола з десятима вузлами** (рис. 4.2). Матриці інцидентності для такого варіанту представлені в табл. 16 та 17. Результати представлені в у варіанті №2, при якому максимальна дальність зв'язку мережі між окремими вузлами відповідає дальності зв'язку між вузлами V1-V8 (ребро X7, довжина якого в 3 рази менше довжини ребра X12) і в варіанті №3, при якому максимальна дальність зв'язку мережі між вузлами відповідає дальності зв'язку між вузлами V1-V7 (ребро X6, довжина якого в 5 рази менше довжини ребра X12).

Розглянемо перешкодостійкість мобільної радіомережі, конфігурація якої на місцевості наближена до форми **коло з п'ятнадцятьма вузлами**, (рис. 4.7 — Додаток Г). Максимальна дальність зв'язку мережі між окремими вузлами відповідає дальності зв'язку між вузлами V7-V14 (ребро X84).

Варіант №11, при якому максимальна дальність зв'язку між окремими вузлами мережі в три рази зменшиться. Потужність передавача і чутливість приймача дозволяють встановити гарантований зв'язок і забезпечують гарантовану передачу пакетів інформації без втрат між абонентами мережевої групи: цим вимогам задовольняють групи V1-V2, V3, V4, V5, V6, V6, V8, V10, V11-V15; V8 - V1, V3, V4, V5, V6-V13, V15. Матриця інцидентності для такого варіанту представлена в табл. 25

Варіант №12, при якому максимальна дальність зв'язку між окремими вузлами мережі в п'ять разів зменшиться. Матриця інцидентності для такого варіанту представлена в табл. 26.

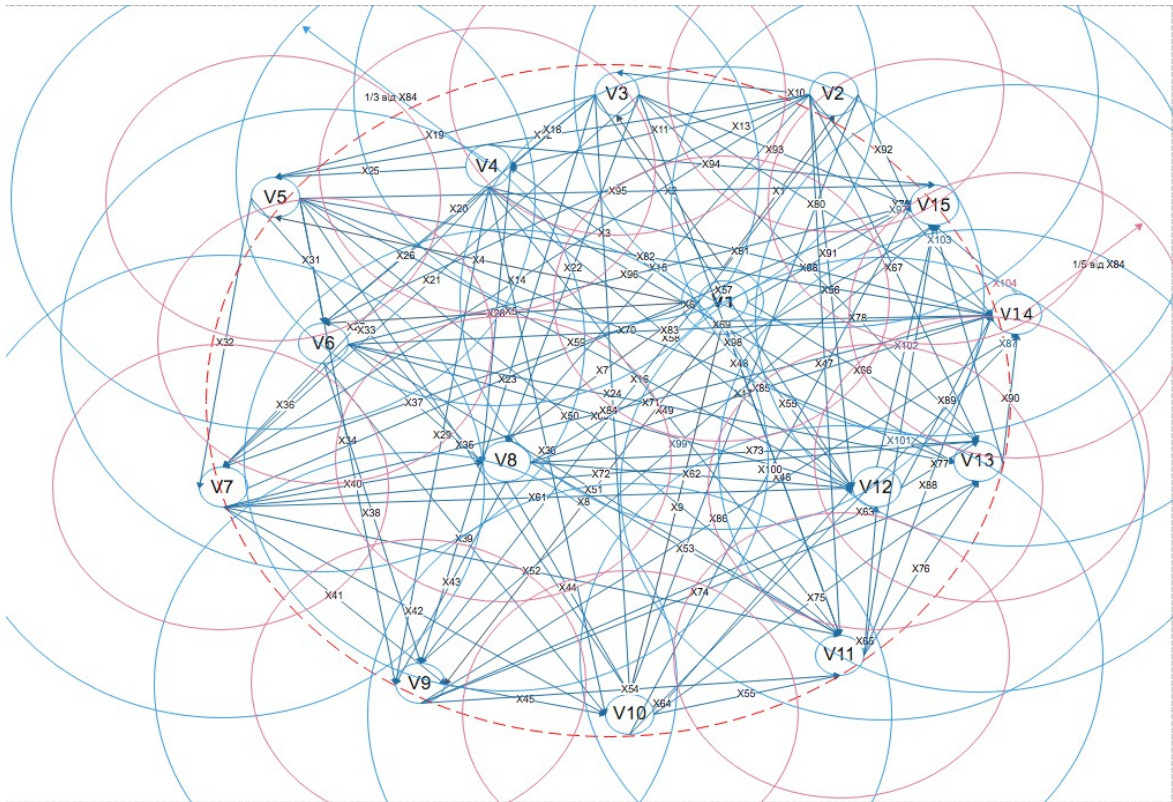


Рис. 4.7 Структура радіомережі з п'ятнадцятьма абонентами (вузлами).

Розглянемо стійкість мобільної одне рангової радіомережі, конфігурація якої на місцевості наближена до форми **кола з двадцятьма вузлами**, (рис. 4.8 - Додаток Г). Максимальна дальність зв'язку мережі між окремими вузлами відповідає дальності зв'язку між вузлами V2-V9 (ребро X16).

Варіант №13, при якому максимальна дальність зв'язку між окремими вузлами мережі в три рази зменшиться. Потужність передавача і чутливість приймача дозволяють встановити гарантований зв'язок і забезпечують гарантовану передачу пакетів інформації без втрат між абонентами мережевої групи: цим вимогам задовольняють групи V1 - V2-V20; V8 - V3-V12. Матриця інцидентності для такого варіанту представлена в табл. 27.

Варіант №14, при якому максимальна дальність зв'язку між окремими вузлами мережі в п'ять разів зменшиться. Потужність передавача і чутливість приймача дозволяють встановити гарантований зв'язок і забезпечують гарантовану передачу пакетів інформації без втрат між абонентами мережевої

групи: цим вимогам задовольняють групи V1-V2, V3, V4, V8, V16, V18, V19, V20; V8 - V1, V6, V7, V9, V10. Матриця інцидентності для такого варіанту представлена в табл. 28.

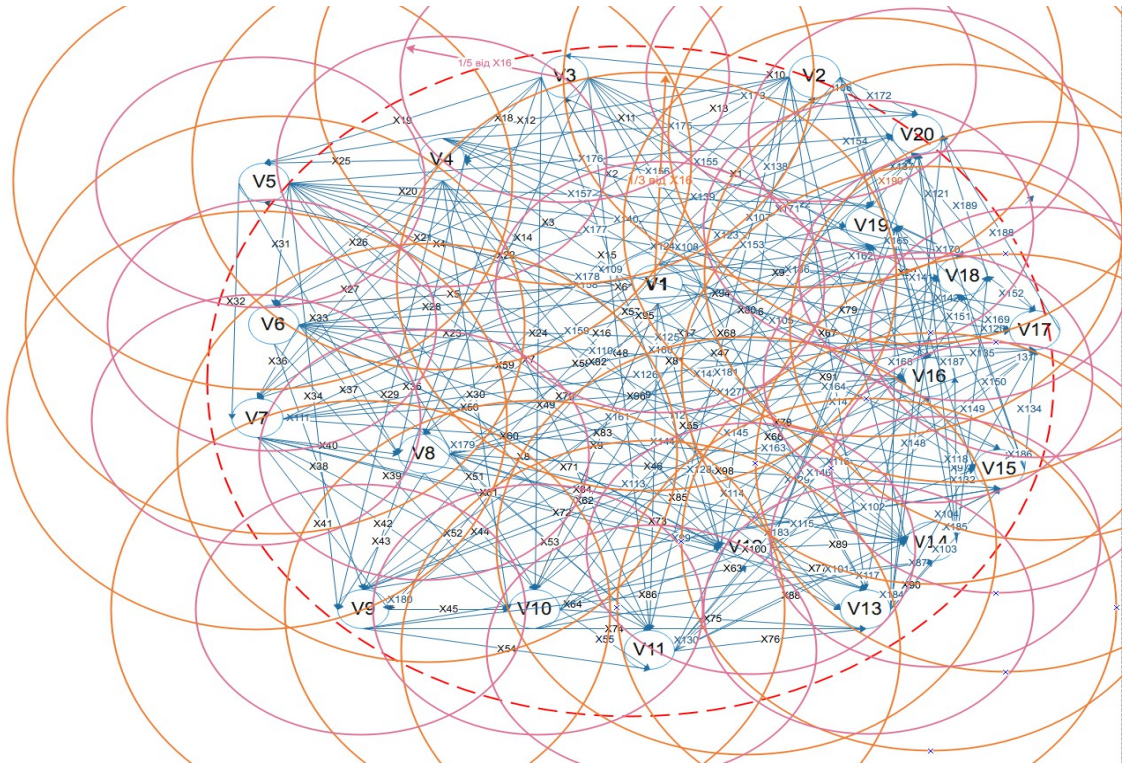


Рис. 4.8 Структура радіомережі з двадцятьма абонентами (вузлами).