

Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору
Національна академія наук України

Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису

ДЗЮБА ВОЛОДИМИР АНДРІЙОВИЧ

УДК 004.942:004.89:621.396

ДИСЕРТАЦІЯ

**ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ МОНІТОРИНГУ МЕРЕЖ
РАДІОЗВ'ЯЗКУ**

122 – «Інформаційні технології»

Подається на здобуття наукового ступеню доктора філософії

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

_____ В. А. Дзюба

Науковий керівник:

Триснюк Василь Миколайович, доктор
технічних наук, професор.

Київ – 2025

АНОТАЦІЯ

Дзюба В.А. Інформаційна технологія моніторингу мереж радіозв'язку – кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 122 – «Інформаційні технології». Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України, Київ, 2025 рік.

У дисертаційній роботі вирішено актуальне наукове завдання створення інформаційної технології моніторингу мереж радіозв'язку, що поєднує методи штучного інтелекту, нейронні мережі глибокого навчання, адаптивну фільтрацію та програмно-визначені радіосистеми (SDR) для підвищення ефективності, точності та оперативності аналізу спектра в умовах ускладненої радіоелектронної обстановки. Актуальність дослідження зумовлена потребою забезпечення достовірного й швидкого контролю радіочастотного простору у складних техногенних, природних і воєнних умовах, коли традиційні методи моніторингу не гарантують своєчасного виявлення джерел випромінювання та адекватного управління частотним ресурсом. Метою роботи є розроблення методів, моделей та алгоритмів інформаційної технології моніторингу радіомереж, здатної до самонавчання, адаптації та функціонування в реальному часі.

У **вступі** обґрунтовано актуальність дослідження, визначено його зв'язок зі швидкозмінними умовами радіоелектронного середовища, сформульовано мету, завдання, об'єкт, предмет, розкрито наукову новизну, практичну цінність і наведено загальну характеристику роботи.

У **першому розділі** дисертації проведено системний аналіз принципів і методів радіомоніторингу, класифіковано частотні діапазони, технічні засоби та програмні підходи до контролю радіосигналів. Визначено, що використання SDR (Software Defined Radio) відкриває можливості для реалізації повного циклу оброблення

сигналів програмними засобами без жорсткої прив'язки до апаратної архітектури. Удосконалено математичні моделі поширення радіохвиль, розроблено рівняння оцінки втрат сигналів, а також визначено вплив іоносферних, рельєфних та техногенних факторів на якість зв'язку. Особливу увагу приділено інтеграції технологій штучного інтелекту у процеси автоматичного дешифрування та класифікації радіосигналів. Розроблено експериментальний модуль навчання згорткових нейронних мереж (CNN) на синтетичних даних, що дозволив досягти точності класифікації понад 95 % у діапазоні 30 МГц – 6 ГГц. Запропоновано архітектуру системи первинного аналізу спектра, що поєднує SDR-модулі, блоки передоброблення сигналів, базу телеметрії та нейронний класифікатор, який здатен виявляти та ідентифікувати понад 15 типів випромінювань у реальному часі.

Другий розділ присвячено формуванню методології управління динамічним розподілом частотного ресурсу в умовах змінної радіообстановки. Запропоновано математичну модель когнітивного управління спектром, що базується на теорії адаптивного навчання (Q-learning) та дозволяє системі самостійно вибирати оптимальні частотні діапазони для моніторингу. Модель описано у вигляді ітераційного процесу прийняття рішень із використанням функцій належності, що формалізують невизначеність радіоелектронних параметрів середовища. Виконано експериментальне моделювання у середовищах GNU Radio та MATLAB, яке показало зниження часу реакції системи на зміну спектра до 0,7 секунди та зростання ефективності використання спектра до 18 %. Виявлено, що застосування нейронних мереж у процесі розподілу частот підвищує адаптивність системи до зовнішніх впливів, забезпечує швидке реагування на появу перешкод і сприяє підвищенню рівня інформаційної стійкості радіомереж.

У третьому розділі запропоновано метод багатопозиційної локалізації джерел радіосигналів, який усуває обмеження класичних пеленгаційних методів у короткохвильовому діапазоні. Розроблено гібридну архітектуру локалізації, що

поєднує SDR-вимірювання, адаптивну фільтрацію сигналів (Extended Kalman Filter), алгоритми компенсації фазових зсувів та глибокі нейронні мережі типу ResNet для виділення спектрально-часових ознак сигналів. Результати моделювання засвідчили, що точність локалізації джерел радіовипромінювання становить 300–500 метрів навіть за умов іоносферних варіацій, мультипасу чи активної протидії. Система зберігає стабільність роботи при відмові до 25 % вимірювальних пунктів, демонструючи властивості м'якого деградування. Використання технології data fusion забезпечило синхронізацію вимірювальних даних і побудову нейронної моделі оцінки координат із високим рівнем достовірності. Запропонований підхід може бути застосований для моніторингу цивільних і військових систем зв'язку, а також для оцінки стану радіоелектронного середовища в умовах інформаційної боротьби.

У **четвертому розділі** здійснено системну інтеграцію результатів у вигляді цілісної інформаційної технології моніторингу мереж радіозв'язку. Створено тришарову архітектуру, що включає сенсорний рівень збору даних SDR-приймачами, аналітичний рівень із нейромережевими алгоритмами оброблення спектрограм і рівень когнітивного управління частотними діапазонами. Реалізовано механізми масштабування, відмовостійкості та кіберзахисту системи, розроблено методи контролю фазової синхронізації, верифікації телеметрії, процедури самотестування і калібрування обладнання. Експериментальні випробування показали зниження середнього часу реакції системи до 1 секунди, підвищення точності локалізації до 95 % та економію ресурсів оброблення до 25 %. Розроблено регламент експлуатації, що визначає політику оновлення нейронних моделей, періодичність калібрування, сценарії тестування та формат звітності. Дорожня карта впровадження передбачає етапне розгортання технології в критичних регіонах, інтеграцію з існуючими системами зв'язку та формування єдиної бази даних радіоактивності спектра.

Отримані результати становлять теоретико-прикладну основу для створення когнітивних систем моніторингу нового покоління, які поєднують штучний інтелект, SDR, нейронні мережі та адаптивне управління спектром. Практичне впровадження розробленої технології забезпечує підвищення ефективності управління радіочастотним ресурсом, зменшення часу прийняття рішень і зміцнення інформаційної стійкості мереж зв'язку у військовій і цивільній сферах.

Ключові слова: інформаційні технології; програмно-визначене радіо (SDR); штучний інтелект; нейронні мережі; когнітивне управління спектром; багатопозиційна локалізація; адаптивна фільтрація; обробка сигналів у реальному часі; кіберзахист; ефективність спектра; іоносферні впливи; інтелектуальні системи радіомоніторингу.

ANNOTATION

Dziuba V.A. Information Technology for Radio Communication Network Monitoring – Qualification scientific work (manuscript).

Thesis for the Doctor of Philosophy degree in specialty 122 – Information Technologies.

Institute of Telecommunications and Global Information Space of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2025.

The dissertation addresses an important scientific and applied problem - the development of an information technology for radio communication network monitoring that integrates artificial intelligence methods, deep neural networks, adaptive filtering, and software-defined radio (SDR) systems. The proposed technology ensures intelligent management of the processes of detection, classification, and localization of radio emission sources in complex electromagnetic environments, significantly improving operational speed, automation level, and analytical accuracy. The research is motivated by the need to enhance spectrum monitoring reliability under dynamically changing conditions - including electromagnetic congestion, intentional interference, and information warfare - where conventional monitoring systems are often inefficient. The main objective of the dissertation is to develop methods, models, and algorithms for a self-learning, adaptive, and real-time operating information technology for radio network monitoring.

The **first part** of the research presents a comprehensive analysis of the principles and modern methods of radio monitoring, including the classification of frequency bands, emission types, and technical control means. Mathematical models of radio wave propagation were refined to describe signal attenuation under ionospheric, relief, and man-made influences. Particular attention is devoted to the integration of artificial intelligence technologies into radio signal analysis. An experimental module for training

convolutional neural networks (CNNs) on synthetic datasets was developed, achieving over 95% classification accuracy for more than 15 types of radio emissions in the 30 MHz – 6 GHz range. The proposed architecture of the intelligent spectrum analysis subsystem combines SDR modules, preprocessing units, telemetry databases, and neural classifiers. This forms the foundation for an integrated, scalable spectrum monitoring system capable of real-time operation.

The **second part presents** a methodological framework for dynamic spectrum resource management under uncertain and hostile conditions. A cognitive spectrum control model based on Q-learning principles was proposed, enabling the adaptive selection of optimal frequency bands according to current spectral load and predicted environmental changes. The model is formalized as an iterative decision-making process using membership functions to describe uncertain parameters of the electromagnetic field. Experimental simulations performed in GNU Radio and MATLAB demonstrated that the system's response time to spectrum changes decreased to 0.7 seconds, while spectrum utilization efficiency increased by 15–18%. The integration of neural network–based adaptive decision-making enhanced the resilience of spectrum management processes, enabling fast reconfiguration and ensuring spectral sustainability even in the presence of active interference.

The **third part** of the dissertation focuses on developing a multiposition radio signal source localization method that overcomes the limitations of traditional direction-finding techniques in the high-frequency band. A hybrid localization architecture was introduced, combining distributed SDR measurements, phase-shift calibration algorithms, extended Kalman filtering (EKF), and deep neural networks of the ResNet family for spatio-temporal feature extraction. The proposed method achieves localization accuracy within 300–500 meters, even under ionospheric variations, multipath propagation, or jamming. The system maintains stable operation with up to 25% node loss, demonstrating “soft degradation” behavior. Data fusion algorithms were implemented to synchronize multi-

node measurement data and estimate signal source coordinates with high confidence. The developed approach enables robust monitoring of both civil and defense communication systems and can serve as the basis for adaptive situational awareness and electromagnetic intelligence applications.

The **fourth part** presents a fully integrated architecture of the developed information technology for radio communication network monitoring. A three-tier system structure is designed: the sensor layer performs SDR-based data collection; the analytical layer applies neural network models for spectrum recognition and anomaly detection; and the cognitive control layer dynamically allocates frequency resources, prioritizes channels, and generates decision-support reports. Mechanisms for scalability, fault tolerance, and cybersecurity were implemented, including distributed computing, phase synchronization control, encryption of telemetry, and automated self-testing routines. Experimental validation confirmed that the system reduces average response time to approximately one second, increases localization accuracy to 95%, and decreases computational load by up to 25%. A structured operational regulation and implementation roadmap were developed, defining model update policies, calibration cycles, and deployment phases across critical communication regions.

The results obtained constitute a theoretical and practical foundation for next-generation cognitive monitoring systems that combine artificial intelligence, SDR, neural networks, and adaptive spectrum management. The practical implementation of the developed technology ensures increased efficiency of spectrum utilization, reduced decision-making time, and improved informational resilience of communication systems under both peacetime and wartime conditions.

Keywords: **information technology**; software-defined radio (SDR); artificial intelligence; neural networks; cognitive spectrum management; radio frequency monitoring; adaptive filtering; multiposition localization; real-time signal processing;

electromagnetic environment; cybersecurity; cognitive communication systems; spectral efficiency.

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації.

Статті у наукових фахових виданнях України.

1.Триснюк Т.В., Дзюба В.А. Методика управління динамічним розподілом частотного ресурсу в умовах радіоелектронної боротьби із використанням sdr технологій. Телекомунікаційні та інформаційні технології. 2025. № 3 (88). С. 150-156. <https://tit.dut.edu.ua/index.php/telecommunication/article/view/2645/2517>

<https://doi.org/10.31673/2412-4338.2025.038717>

2.Триснюк, В., Дзюба, В. (2025). Інформаційна технологія динамічного управління частотним ресурсом у складній радіоелектронній обстановці. *Електронне фахове наукове видання «Кібербезпека: освіта, наука, техніка»*, 2(30), 607–615. <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2025.30.999>

<https://doi.org/10.28925/2663-4023.2025.30.999>

3.Триснюк, В., Дзюба В. (2025). Інтелектуальні методи багатопозиційної локалізації джерел радіосигналів з використанням нейронних мереж та адаптивних фільтрів. *Кібербезпека: освіта, наука, техніка*, 1(29), 452–463. Електронне фахове наукове видання <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2025.29.899>

<https://doi.org/10.28925/2663-4023.2025.29.899>

4. Дзюба В.А. Застосування згорткових нейронних мереж для підвищення точності багатопозиційної локалізації джерел радіовипромінювання. . *Екологічна безпека та природокористування*, Вип. 3 (55), 2025 р., с. 116-122.

5.Триснюк В.М., Дзюба В.А., Тимчук В.Ю. Інформаційно-технічне моделювання ліквідації наслідків військових дій та техногенних катастроф на території України. *Екологічна безпека та природокористування*, Вип. 1 (49), 2024 р., с. 143-155. ISSN: 2411-4049. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2024.1.143-155>

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2024.1.143-155>

Участь у конференціях.

1. Триснюк В. М., Дзюба В. А., Молодецький Б. В., Актуальність створення інформаційної системи радіомоніторингу УКХ-діапазону з використанням ГІС-технологій. Міжнародна наукова конференція_«Сучасний стан та перспективи розвитку систем і засобів спеціального призначення, підвищення якості підготовки фахівців високотехнологічних спеціальностей з урахуванням досвіду широкомасштабної збройної агресії РФ проти України» Житомирський військовий інститут імені С. П. Корольова 30 травня 2025 року с. 68-70
<https://kzmi.mil.gov.ua/uk/nauka/naukovi-konferentsii-ta-seminary.html>

2. Триснюк Т., Молодецький Б., Мосійчук Д., Дзюба В., Фадеїчев В. Системи радіомоніторингу для забезпечення екологічної безпеки та контролю ефірного простору Матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції «Green Construction» («Зелене будівництво»). Київ, 13-14 травня 2025 року Київський національний університет будівництва і архітектури. с. 305-307
https://www.researchgate.net/publication/391850_615

3. Нагорний Є.І., Дзюба В.А. Приступа В.В. Створення підсистеми консолідованої обробки інформації при вогневому ураженні Математичне моделювання та інформаційно-комунікаційні технології для зміцнення та відновлення // Колективна монографія за матеріалами XXIII Міжнародної науково-практичної конференції (Київ, 12-13 листопада 2024 р.) / За заг. ред. С.О. Довгого. – К.: ТОВ «Видавництво «Юстон», 2024. – с. 64-65
[24_zbirka_all_07_11_2024_148x210](https://zbirka.all.07.11.2024.148x210)

4. Триснюк Т.В., Тимчук В.Ю., Волинець Т.В., Дзюба В.А. Відновлювальні заходи наслідків військових дій та техногенних катастроф на території України. Актуальні проблеми та інноваційні технології у сфері гуманітарного розмінування, цивільного захисту, критичної інфраструктури та екологічної безпеки для

повоєнного відновлення України: Збірник наукових праць Міжнародної науково-практичної конференції: НУХТ, 6 – 7 листопада 2024. С.80 – 90.

5.В.О. Шумейко, Т.В. Триснюк, Т.В. Волинець, В. М. Марущак, В. А. Дзюба. Інформаційне забезпечення систем екологічного моніторингу транскордонних впливів. «IX Міжнародний з'їзд екологів». Вінниця, 25-27 вересня 2024 р. с.265-267.<https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/ecology/ecology2024/paper/viewFile/22214/18372>

6.Триснюк Т.В., Конецька О.О., Нагорний Є.І., Приступа В.В., Дзюба В.А., Василенко В.М. Комплексне застосування ГІС - технологій для моніторингу пошкоджених об'єктів критичної інфраструктури. 22 Міжнародна науково-практична конференція «Інформаційно-комунікаційні технології для перемоги та відновлення». Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України м. Київ 14-15 листопада 2023 р. с. 117-120. https://itgip.org/wp-content/uploads/2023/11/1_zbirka_08_11_23-1-1.pdf

7.Дзюба В.А. Зорін К., Шумейко В.О. Взаємозв'язок інформаційних технологій та суспільства під час війни: політикоправовий аспект. Матеріали XXVIII-ої Міжнародної науково-практичної конференції (07 січня 2023 року, Лімасол (Кіпр), дистанційно). Сучасні аспекти модернізації науки: стан, проблеми, тенденції розвитку. с. 336-342

<https://dspace.uzhnu.edu.ua/jspui/bitstream/lib/48475/1/%D0%97%D0%B1%D1%96%D1%80%D0%BD%D0%B8%D0%BA%2C%20%D0%BA%D0%BE%D0%BD%D1%84%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%BD%D1%86%D1%96%D1%8F%20%281%29.pdf>

8.Триснюк В.М., Конецька О.О., Волинець Т.В. Сметанін К.В., Дзюба В.А. Особливості класифікації джерел небезпеки, що призводять до надзвичайних ситуацій воєнного характеру. Інформаційно-комунікаційні технології та сталий розвиток. Колективна монографія за матеріалами XXI Міжнародної науково-

практичної конференції. Київ, 14-16 листопада 2022 р. За заг. ред. С.О. Довгого. – К.: ТОВ «Видавництво. «Юстон», 2022. – с. 143-145. https://itgip.org/wp-content/uploads/2022/12/2022-12-06_UDK_book_Monografia_48x210.pdf

9.Зорін К.М., Дзюба В.А. Науковий та освітній виміри, як умови сталого розвитку суспільства. Інформаційно-комунікаційні технології та сталий розвиток. Колективна монографія за матеріалами XXI Міжнародної науково-практичної конференції. Київ, 14-16 листопада 2022 р. За заг. ред. С.О. Довгого. – К.: ТОВ «Видавництво. «Юстон», 2022. – с. 230-232.
<https://itgip.org/wp-content/uploads/2022/12/2022-12-06UDKbookMonografia48x210.pdf>

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	17
ВСТУП.....	18
РОЗДІЛ 1 ІНФОРМАЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ПІДХОДИ ДО АНАЛІЗУ ТА ОРГАНІЗАЦІЇ РАДІОМОНІТОРИНГУ МЕРЕЖ РАДІОЗВ’ЯЗКУ	26
1.1. Теоретичні засади радіомоніторингу та поширення радіохвиль у різних діапазонах частот	26
1.1.1. Сутність і призначення радіомоніторингу	26
1.1.2. Основи поширення радіохвиль у середовищі Землі	28
1.1.3. Особливості поширення радіохвиль в умовах радіоелектронної протидії та завадових впливів	33
1.2. Аналіз сучасних систем та засобів радіомоніторингу	37
1.2.1. Архітектура і компоненти стаціонарних і мобільних систем	37
1.2.2. Методи визначення параметрів сигналів і джерел випромінювання	39
1.2.3. Тенденції автоматизації радіомоніторингу у військових та цивільних структурах	42
1.3. Постановка наукового завдання	46
1.3.1. Проблеми ефективного розподілу частотного ресурсу	46
Висновки до розділу 1.....	49
РОЗДІЛ 2. ПРОГРАМНІ АЛГОРИТМИ ТА АРХІТЕКТУРА ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ МОНІТОРИНГУ	52
2.1. Архітектура інформаційної технології моніторингу	52
2.1.1. Архітектура сучасних систем радіомоніторингу	52
2.1.2. Концепція обробки сигналів	55
2.1.3. Програмні алгоритми фільтрації	57

2.1.4. Порівняльний аналіз найбільш поширених моделей.....	58
2.2. Алгоритмічне забезпечення аналізу сигналів	74
2.3. Математична модель оптимізації розподілу спектра	76
2.4. Модульна структура програмного комплексу та інтерфейс користувача	76
2.5. Міжнародний досвід і порівняльний аналіз SDR-систем у радіомоніторингу	78
2.5.1. Розвиток технологій програмно-визначеного радіо	78
2.5.2. Міжнародні стандарти системами радіомоніторингу.....	79
Висновки до розділу 2.....	80
РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЬ УПРАВЛІННЯ ДИНАМІЧНИМ РОЗПОДІЛОМ	
ЧАСТОТНОГО РЕСУРСУ	82
3.1. Концепція когнітивного радіо та інтелектуального управління спектром	82
3.1.1. Архітектура когнітивної системи	82
3.1.2. Алгоритми аналізу спектра та виявлення сигналів	84
3.1.3. Цикл сприйняття – аналіз – адаптація	85
3.2. Методика динамічного управління частотним ресурсом у складних умовах	87
3.2.1. Q-навчання для вибору оптимальних частот	87
3.2.2. Математичні моделі функції корисності	89
3.2.3. Параметри швидкодії, стійкості, точності системи	94
3.2.4. Алгоритм адаптивного управління частотним ресурсом	95
3.2.5. Аналіз стабільності та критерії ефективності	98
3.3. Моделювання SDR-систем у середовищі GNU Radio та MATLAB	99
3.3.1. Побудова симуляційної моделі.....	99
3.3.2. Аналіз результатів і критерії оптимізації	101
3.3.3. Валідація результатів експериментів	105

Висновки до розділу 3.....	107
РОЗДІЛ 4. УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ БАГАТОПОЗИЦІЙНОЇ ЛОКАЛІЗАЦІЇ ДЖЕРЕЛ РАДІОСИГНАЛІВ З ВИКОРИСТАННЯМ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ.....	108
4.1. Оптимізація моделі локалізації джерел радіовипромінювання	109
4.1.1. Іоносферно-космічні фактори та їхній вплив на спостережуваність	109
4.1.2. Обмеження класичних методів і формулювання вимог	110
4.1.3. Принципи побудови адаптивної багатопозиційної системи	113
4.2 Метод інтелектуальної багатопозиційної локалізації джерел радіосигналів на основі нейронних мереж та адаптивних фільтрів	114
4.2.1. Архітектура приймачів і синхронізація вимірювань	114
4.2.2. Нейромережева підсистема та модуль злиття даних	117
4.2.3. Експериментальні дослідження системи в змодельованих умовах.....	121
4.3. Модельно-експериментальна валідація інтелектуальної локалізації	126
4.3.1. Дизайн експериментів і метрики оцінювання	126
4.3.2. Результати моделювання та польових випробувань.....	127
4.3.3. Аналіз похибок, чутливість і обмеження	129
4.4. Системна інтеграція, масштабування та безпека експлуатації.....	131
4.4.1. Програмно-апаратна реалізація та часові опори.....	131
4.4.2. Масштабування, відмовостійкість і кіберзахист	135
4.4.3. Оцінка ефективності, регламент і дорожня карта впровадження	140
Висновки до розділу 4.....	145
ВИСНОВКИ	146
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	149

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

AI – Artificial Intelligence

DL – Deep Learning

DSP – Digital Signal Processing

EHF – Extremely High Frequency

ELF – Extremely Low Frequency

HF – High Frequency

IoT – Internet of Things

ITU – International Telecommunication Union

LF – Low Frequency

MF – Medium Frequency

ML – Machine Learning

NLP – Natural Language Processing

RF – Radio Frequency

SDR – Software Defined Radio

SHF – Super High Frequency

UHF – Ultra High Frequency

VHF – Very High Frequency

ВСТУП

Актуальність теми. Радіочастотний спектр є стратегічним ресурсом держави, що визначає стійкість і ефективність систем управління, зв'язку, навігації та спостереження у цивільній і військовій сферах. У сучасних умовах збройної агресії проти України радіоелектронна обстановка характеризується високою динамікою, насиченістю різномірними передавальними засобами, навмисними перешкодами, складними сценаріями маскувannya та імітації сигналів. Активне застосування засобів радіоелектронної боротьби, кібератак на комунікаційні інфраструктури, а також широке використання безпілотних систем і мобільних ретрансляторів змінюють класичні уявлення про розподіл і використання спектра, ускладнюють виявлення, класифікацію та геолокацію джерел випромінювання.

Традиційні підходи до радіомоніторингу - дискретні вимірювання, ручний аналіз, локальні пости - виявляються недостатньо ефективними в умовах інформаційного перевантаження, швидкого маневру частотами і протидії. Водночас розвиток програмно-визначених радіотехнологій (software defined radio), методів інтелектуального аналізу даних і розподілених обчислень відкриває можливості для створення інтегрованих інформаційних технологій моніторингу: з безперервним спостереженням за спектром у широких діапазонах, адаптивним виявленням складно-модульованих сигналів, автоматизованою класифікацією джерел і підтримкою рішень щодо управління частотним ресурсом у реальному часі.

Особливої гостроти набуває завдання моніторингу мереж радіозв'язку у тактичній і оперативній ланках управління: від виявлення ворожих вузлів і каналів зв'язку до контролю власних мереж на предмет перевантажень, взаємних завад та уразливостей. Від якості таких рішень залежать ситуаційна обізнаність, синхронізація дій сил оборони, безпека критичних сервісів і стійкість інформаційної інфраструктури. Отже, розроблення науково обґрунтованої

інформаційної технології моніторингу радіочастотного простору з урахуванням чинників військового часу і радіоелектронної протидії є актуальним науково-прикладним завданням державної ваги.

Мета і завдання дослідження. Мета роботи - розробити науково обґрунтовану інформаційну технологію моніторингу радіочастотного простору (мереж радіозв'язку) в умовах радіоелектронної протидії, що забезпечує адаптивне виявлення, класифікацію та локалізацію джерел випромінювання, а також підтримку прийняття рішень щодо динамічного управління спектром і підвищення стійкості комунікацій.

Об'єкт дослідження - процеси моніторингу радіочастотного простору та функціонування мереж радіозв'язку в умовах радіоелектронної протидії і високої спектральної динаміки.

Предмет дослідження - моделі, методи і засоби інформаційної технології моніторингу: алгоритми виявлення і класифікації сигналів, методи багатопозиційної локалізації, когнітивні підходи до управління спектром, архітектурні рішення сенсорних мереж і центрів оброблення.

Методи дослідження. Застосовано системний аналіз, математичне моделювання процесів у спектральному середовищі, методи теорії сигналів, статистичного оцінювання, інтелектуального аналізу даних. Експерименти виконувались у середовищах GNU Radio та MATLAB з використанням реальних і синтетичних сигналів, а також випробувань на апаратних платформах програмно-визначених радіосистем.

Для досягнення мети поставлено такі завдання:

1. Проаналізувати сучасні радіотехнології і засоби радіомоніторингу, визначити їхні обмеження в умовах воєнного часу та активних перешкод.
2. Розробити математичну модель управління динамічним розподілом частотного ресурсу, яка поєднує методи когнітивного аналізу спектра, теорію ігор,

адаптивне керування та машинне навчання для формування універсальної основи побудови інтелектуальних систем зв'язку нового покоління.

3. Створити програмно-алгоритмічний модуль навчання згорткових нейронних мереж (CNN) на синтетичних наборах даних для класифікації сигналів у широкому діапазоні частот (30 МГц–6 ГГц) з високою точністю розпізнавання за різних рівнів SNR.

4. Розробити алгоритмічний комплекс інтелектуального аналізу сигналів, який забезпечує надійне виявлення, класифікацію та локалізацію неоднорідних радіовипромінювань за умов низького співвідношення сигнал/шум, маневрування частотою та впливу перешкод.

5. Удосконалити методику динамічного управління частотним ресурсом на основі Q-навчання та функцій корисності, що враховують швидкодію, стійкість, точність і енергетичну ефективність системи в умовах радіоелектронної протидії.

6. Розробити симуляційну SDR-модель і практичну архітектуру впровадження інформаційної технології моніторингу радіочастотного простору, включно з регламентом експлуатації, кіберзахистом і дорожньою картою інтеграції в державні системи спектрального моніторингу України.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Дисертаційну роботу виконано в Інституті телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України як основній установі, у контексті науково-дослідних тем Інституту, спрямованих на підвищення інформатизаційної стійкості та безпеки. Наукові результати дисертації отримані в межах програми науково-дослідних робіт та реалізовані у тематиках: «Розробка засобів інформаційно-аналітичної підтримки завдань забезпечення стійкості об'єктів критичної інфраструктури в регіональній соціоєкосистемі за умов зростання природних, техногенних і соціальних загроз» (№ ДР 0121U109216), «Розробка обчислювальних технологій та методів моделювання для дослідження

нестационарних процесів» (№ РК 0116U000793 державної реєстрації), Закон України «Про національну безпеку України», Стратегія національної безпеки України «Безпека людини – безпека країни» та Концепція розвитку цифрової економіки та суспільства України.

Робота відповідає державним пріоритетам зміцнення обороноздатності, цифрової трансформації та захисту критичної інфраструктури, сприяє виконанню міжвідомчих завдань у сфері спектральної безпеки, моніторингу та управління радіочастотним ресурсом.

У дисертації отримано такі нові наукові результати:

1. *Вперше* запропоновано інтегровану математичну модель управління динамічним розподілом частотного ресурсу для радіомереж у умовах радіоелектронної протидії, яка об'єднує когнітивне сприйняття спектра, елементи теорії ігор (для узгодження інтересів багатьох користувачів), адаптивне керування та методи підкріплювального і глибинного навчання у єдину керуючу систему.

2. *Вперше* розроблено та експериментально реалізовано програмний модуль навчання CNN на синтетичних даних для задач радіомоніторингу; забезпечено розпізнавання більше 15 класів сигналів у діапазоні 30 МГц–6 ГГц з точністю більше 95% при варіативних SNR і частотному маневруванні.

3. *Вперше* створено алгоритмічний комплекс інтелектуального аналізу сигналів (виявлення → класифікація → локалізація), стійкий до низького SNR, мультипасу та частотних перестроювань; комплекс поєднує енергетичні, кореляційні та спектрально-фазові ознаки з механізмами адаптивного порогування і злиття даних.

4. *Удосконалено* методику динамічного управління спектром на основі Q-навчання: введено моделі функції корисності з вагами для пропускну здатності, завадостійкості, енергоспоживання і швидкодії, а також критерії оцінювання (час реакції, стабільність, точність), що забезпечують збіжність рішень в умовах РЕБ.

5. *Набула подальшого розвитку* технологія моделювання SDR-систем (GNU Radio / MATLAB) для відтворення бойових сценаріїв РЕО та перевірки робастності розроблених алгоритмів; показано відтворюваність показників точності/часу реакції та можливість інтеграції модулів у прикладні стенди.

6. *Запропоновано* практичну архітектуру впровадження (регламент, інтероперабельність, кіберзахист, масштабування) для інтеграції технології у державні системи моніторингу радіочастотного простору з орієнтацією на підвищення спектральної безпеки в умовах війни та відбудови.

Практичне значення одержаних результатів

1. Створено прототип інформаційної технології моніторингу радіочастотного простору, який забезпечує виявлення, класифікацію та локалізацію джерел випромінювання в режимі реального часу. Технологія реалізована у вигляді модульної системи на базі SDR-платформ із можливістю адаптивного керування спектром, інтеграції до існуючих комплексів радіомоніторингу та розгортання в польових умовах.

2. Розроблено програмний модуль інтелектуальної обробки сигналів, який реалізує навчання згорткових нейронних мереж (CNN) на синтетичних наборах даних для класифікації основних типів сигналів у діапазоні 30 МГц–6 ГГц. Модуль апробовано у середовищах GNU Radio і MATLAB, досягнуто точності розпізнавання понад 95 %, що підтверджує ефективність використання штучних нейронних мереж для задач радіомоніторингу.

3. Розроблено симуляційну SDR-модель для тестування алгоритмів управління динамічним розподілом частотного ресурсу, яка дозволяє моделювати різні сценарії радіоелектронної обстановки, у тому числі активну протидію, перевантаження спектра та взаємні завади. Отримані результати використано для калібрування параметрів системи, оцінки точності та часу реакції у реальних діапазонах частот.

4. Підготовлено рекомендації та технічний регламент щодо впровадження інформаційної технології моніторингу радіочастотного простору у державну систему спектрального контролю. У документі визначено процедури калібрування, оновлення моделей, забезпечення кіберзахисту, проведення «стрес-тестів» та взаємодії з існуючими комплексами радіоелектронної розвідки і зв'язку. Реалізація регламенту дозволить підвищити ефективність управління спектром, забезпечити інформаційну стійкість зв'язку й посилити національну безпеку України в умовах воєнного часу та післявоєнного відновлення.

Особистий внесок здобувача. Усі наукові результати, що виносяться на захист, отримані здобувачем самостійно. У публікаціях, підготовлених у співавторстві, особистий внесок автора полягає у:

- розробці математичної моделі управління динамічним розподілом частотного ресурсу, що поєднує принципи когнітивного радіо, теорію ігор, адаптивне керування та методи машинного навчання;
- створенні програмно-алгоритмічного модуля глибинного аналізу сигналів з використанням згорткових нейронних мереж (CNN) та формуванні синтетичних навчальних наборів даних для моделювання складних радіоелектронних умов;
- розробці алгоритмічного комплексу виявлення, класифікації та локалізації джерел радіовипромінювання, стійкого до низьких значень SNR і частотного маневрування;
- удосконаленні методики динамічного управління спектром на основі Q-навчання та багатокритеріальних функцій корисності, що враховують швидкодію, стійкість, точність і енергетичну ефективність системи;
- створенні симуляційної SDR-моделі та проведенні експериментів у середовищах GNU Radio і MATLAB для оцінки точності, часу реакції та ефективності роботи системи;

– розробці архітектури та регламенту впровадження інформаційної технології моніторингу радіочастотного простору, включно з вимогами до масштабування, синхронізації, кіберзахисту та інтеграції у державну систему спектрального контролю України.

Отримані результати є особистим науковим здобутком дисертанта та мають завершений теоретико-прикладний характер, що забезпечує їх практичне використання у сфері національної системи радіомоніторингу, оборонних технологій та інформаційної безпеки держави.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертації оприлюднені: Основні результати дисертаційного дослідження апробовано на таких наукових форумах: Міжнародна наукова конференція «Сучасний стан та перспективи розвитку систем і засобів спеціального призначення...», Житомирський військовий інститут імені С. П. Корольова (2025 р.); IV Міжнародна науково-практична конференція «Green Construction» («Зелене будівництво»), Київський національний університет будівництва і архітектури (2025 р.); XXIII Міжнародна науково-практична конференція «Математичне моделювання та інформаційно-комунікаційні технології для зміцнення та відновлення» (2024 р.); Міжнародна науково-практична конференція «Актуальні проблеми та інноваційні технології у сфері гуманітарного розмінування, цивільного захисту, критичної інфраструктури та екологічної безпеки для повоєнного відновлення України», НУХТ (2024 р.); IX Міжнародний з'їзд екологів (Вінниця, 2024 р.); XXII Міжнародна науково-практична конференція «Інформаційно-комунікаційні технології для перемоги та відновлення», Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України (2023 р.); XXVIII Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні аспекти модернізації науки: стан, проблеми, тенденції розвитку» (Лімасол, Кіпр, 2023 р.). XXI Міжнародна науково-практична конференція «Інформаційно-комунікаційні технології та сталий розвиток»,

Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України (2022 р.).

Публікації. Результати дисертаційних досліджень опубліковані в 14 наукових працях: 5 статтях у наукових фахових виданнях України та 9 тез міжнародних науковопрактичних конференцій..

Структура та об'єм дисертації. Дисертація складається зі вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел, 2 додатків. Повний обсяг дисертації становить 163 сторінки, з них 149 – основного тексту; 20 – ілюстрацій, 14 – таблиць; список 66 використаних джерел.

РОЗДІЛ 1 ІНФОРМАЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ПІДХОДИ ДО АНАЛІЗУ ТА ОРГАНІЗАЦІЇ РАДІОМОНІТОРИНГУ МЕРЕЖ РАДІОЗВ'ЯЗКУ

У розділі узагальнено теоретичні засади побудови сучасних систем радіомоніторингу та окреслено ключові напрями розвитку інформаційних технологій для управління радіочастотним простором. Показано, що в умовах зростання спектральної щільності сигналів і активного використання засобів радіоелектронної боротьби особливої актуальності набуває інтеграція методів когнітивного аналізу, штучного інтелекту (AI) та програмно-визначуваних радіосистем (SDR). Проведено систематизацію діапазонів радіохвиль і характеристик поширення сигналів у різних середовищах, визначено аналітичні залежності для моделювання втрат потужності та якості каналів зв'язку. Окрему увагу приділено формуванню архітектури інформаційної технології моніторингу, що об'єднує сенсорні, аналітичні та комунікаційні рівні в єдину ієрархічну систему управління спектром у воєнних і цивільних умовах.

1.1. Теоретичні засади радіомоніторингу та поширення радіохвиль у різних діапазонах частот

1.1.1. Сутність і призначення радіомоніторингу

Радіомоніторинг є однією з ключових функціональних складових системи управління радіочастотним ресурсом держави. Його основне завдання полягає у спостереженні, вимірюванні та аналізі параметрів сигналів, що випромінюються різними джерелами у радіоефірі. Це дає змогу виявляти нові джерела випромінювання, контролювати їхню діяльність, запобігати несанкціонованому використанню спектра, оцінювати рівень завад і забезпечувати надійність систем зв'язку.

Радіомоніторинг здійснюється на основі спеціалізованих апаратно-програмних комплексів, які складаються з приймальних станцій, антенних систем, аналізаторів спектра, засобів цифрової обробки сигналів та інформаційних систем збору, збереження і візуалізації даних. У військовій сфері він є критично важливим для контролю електромагнітної обстановки, виявлення сигналів противника, оцінки ефективності засобів радіоелектронної боротьби (РЕБ) та забезпечення стійкості власних каналів зв'язку.

Радіочастотний моніторинг виступає одним із ключових засобів отримання достовірних даних про стан електромагнітної обстановки в певних територіальних зонах. Проте темпи розвитку сучасних телекомунікаційних технологій значно випереджають рівень розвитку систем моніторингу, що ускладнює оперативне реагування на нові виклики у цій сфері. Застосування інноваційних радіотехнологій, побудованих на складних типах сигналів - зокрема сигналів із розширенням спектра та шумоподібних структур - а також активне використання високочастотних діапазонів зумовлюють необхідність створення нових інформаційних технологій. Такі технології мають забезпечувати ефективний аналіз і синтез структурних, інформаційних та функціональних моделей об'єктів і процесів, зокрема у частині розроблення методів радіомоніторингу та вимірювання характеристик зазначених сигналів [1].

Водночас слід підкреслити, що в сучасній науково-технічній літературі бракує комплексних досліджень, присвячених вирішенню проблем радіомоніторингу новітніх або нетипових радіотехнологій, а також специфічних систем і стандартів зв'язку. На глобальному рівні координацією діяльності у сфері радіозв'язку займається Міжнародний союз електрозв'язку (International Telecommunication Union, ITU) - спеціалізована агенція Організації Об'єднаних Націй, відповідальна за питання цифрових технологій. ITU об'єднує 194 держави-члени, понад тисячу комерційних компаній, університетів та міжнародних організацій. Головний офіс

Союзу розташований у Женеві (Швейцарія), а регіональні представництва функціонують на всіх континентах. ІТУ є найстарішою інституцією системи ООН, яка забезпечує глобальну взаємодію у сфері зв'язку ще з 1865 року, коли було введено телеграф. Організація відповідає за міжнародну координацію у використанні радіочастотного спектра й супутникових орбіт, а також за розроблення технічних стандартів, що гарантують сумісність і стабільність сучасних комунікаційних систем [2].

1.1.2. Основи поширення радіохвиль у середовищі Землі

Поширення радіохвиль описує процес перенесення енергії електромагнітного поля у просторі. Радіохвиля може відбиватися, заломлюватися, розсіюватися або поглинатися середовищем, у якому поширюється. Основними фізичними чинниками, що впливають на поширення, є провідність, діелектрична проникність, вологість, атмосферні умови, топографія місцевості та іоносферні процеси. Основними продуктами ІТУ є нормативні Рекомендації. Рекомендації – це стандарти, що визначають, як працюють та взаємодіють телекомунікаційні мережі. Рекомендації ІТУ не є обов'язковими, проте їх зазвичай дотримуються завдяки їхній високій якості, а також тому, що вони гарантують взаємозв'язок мереж і дозволяють надавати телекомунікаційні послуги у світовому масштабі.

Ненормативні продукти включають додатки до рекомендацій, довідники ІТУ, посібники для впроваджувачів та доповнення. Ще одним продуктом ІТУ є Операційний бюлетень, який являє собою детальне оновлення, що видається раз на два тижні та містить інформацію, необхідну для підтримки глобального взаємозв'язку світових телекомунікаційних мереж [5-10]. Ці документи також містять велику кількість стандартів, які стосуються класифікації радіохвиль та умов їх поширення.

Розподіл радіочастотних діапазонів може здійснюватися за різними критеріями - зокрема за числовими значеннями частоти, довжиною хвилі та іншими параметрами. На практиці найбільш поширеним підходом є класифікація радіочастот за діапазонами, приклад якої подано в таблиці 1.1 [1].

Таблиця 1.1. Класифікація діапазонів радіохвиль

Позначення діапазону	Діапазон частот (Гц)	Довжина хвилі (м)	Типові сфери застосування
LF (низькі)	30 кГц – 300 кГц	10 000 – 1 000	Навігаційні системи, морський зв'язок
MF (середні)	300 кГц – 3 МГц	1 000 – 100	Радіомовлення, маяки
HF (високі)	3 МГц – 30 МГц	100 – 10	Іоносферний зв'язок, короткохвильові канали
VHF (дуже високі)	30 МГц – 300 МГц	10 – 1	Авіація, телебачення, військові системи
UHF (ультрависокі)	300 МГц – 3 ГГц	1 – 0,1	Мобільний зв'язок, супутники
SHF (надвисокі)	3 ГГц – 30 ГГц	0,1 – 0,01	Радари, Wi-Fi, супутникові мережі
EHF (екстрависокі)	30 ГГц – 300 ГГц	0,01 – 0,001	Космічні системи, міліметрові канали

Діапазон коротких хвиль (КХ) традиційно поділяють на кілька піддіапазонів: низьких частот (НЧ; LF, Low Frequency), середніх частот (СЧ; MF, Medium Frequency) та високих частот (ВЧ; HF, High Frequency). У свою чергу, діапазон ультракоротких хвиль (УКХ) охоплює такі піддіапазони: дуже високих частот (ДВЧ; VHF, Very High Frequency), ультрависоких частот (УВЧ; UHF, Ultra High

Frequency), надвисоких частот (НВЧ; SHF, Super High Frequency), вельми високих частот (ВВЧ; EHF, Extra High Frequency) та гіпервисоких частот (ГВЧ; NHF, Nuper High Frequency).

Такий поділ радіочастотних діапазонів є умовним, оскільки для супутникових і військових систем зв'язку застосовуються й альтернативні, буквені позначення. Проте зазначена класифікація має практичну цінність, адже ґрунтується, з одного боку, на декадному змінюванні частотних значень, а з іншого - на спільних закономірностях поширення радіохвиль у просторі. Ці закономірності визначають особливості оброблення сигналів і побудови приймальних трактів радіоелектронних засобів (РЕЗ) та технічних систем радіоконтролю, зокрема їхніх антенних систем (АС) [11].

Під час функціонування систем радіозв'язку, розташованих на земній поверхні, рівень сигналу, який приймає РЕЗ, істотно залежить від характеристик траси поширення хвиль - рельєфу місцевості, стану тропосфери та іоносфери, а також від пори року, часу доби та інших природних чинників [12]. Іоносфера - це іонізований шар атмосфери, що простягається на висоті приблизно від 60–80 км до 1000–1200 км над поверхнею Землі. Основним джерелом іонізації є сонячне випромінювання, проте додатковий внесок у цей процес роблять космічні промені та мікрочастинки космічного пилу, які постійно потрапляють в атмосферу. Окрім постійних, існують і тимчасові джерела іонізації - потужні сонячні спалахи, потоки метеорів тощо.

Під впливом цих факторів формуються кілька іонізованих шарів, що поступово переходять один в інший, а їхня густина залежить від висоти, інтенсивності сонячної активності та щільності атмосфери. У реальній іоносфері розподіл іонізації є неоднорідним і має кілька максимумів, які визначають три основні шари: D, E та F. Їхній ступінь іонізації змінюється залежно від пори року, часу доби та

географічного положення. Шар D розташований на висоті близько 60–100 км, E - на висоті 100–150 км, а F - на висоті 150–420 км.

Шар F характеризується максимальною електронною концентрацією й виконує роль головного відбивного шару для іоносферного поширення короткохвильових сигналів (до межі 10-метрового діапазону). У денний час він розділяється на дві складові - F_1 (150–250 км) і F_2 (300–420 км).

Під дією природних або штучних чинників радіосигнали зазнають паразитних амплітудно-фазових змін, які можуть проявлятися у вигляді мерехтіння, завмирань (загальних або частотно-селективних) тощо. Найпоширенішою причиною таких спотворень є багатопроменеве поширення радіохвиль, що призводить до коливань рівня прийнятого сигналу в часі.

Механізми поширення радіохвиль класифікують за фізичними принципами їхнього розповсюдження у навколишньому середовищі. Залежно від умов і середовища передачі сигналу, розрізняють вісім основних типів поширення:

- тропосферне (атмосферне) хвилевідне поширення, яке відбувається внаслідок утворення природних хвилеводів у нижніх шарах атмосфери;
- поширення земною (поверхневою) хвилею, що здійснюється вздовж поверхні Землі завдяки взаємодії електромагнітної хвилі з ґрунтом;
- іоносферне поширення, при якому хвиля відбивається від іонізованих шарів атмосфери та повертається на земну поверхню;
- просторове поширення, що включає пряму хвилю та відбиті компоненти, які формуються внаслідок взаємодії сигналу з природними або штучними перешкодами;
- дифракційне поширення, коли хвиля огинає перешкоди, зберігаючи можливість прийому сигналу навіть у зонах часткової тіні;
- тропосферне розсіювання, зумовлене нерівномірністю щільності тропосфери, що сприяє розсіюванню енергії хвилі на великі відстані;

- поширення у межах прямої видимості, яке реалізується при відсутності суттєвих перешкод між передавальною та приймальною антенами;
- розсіювання радіохвиль гідрометеорами, спричинене взаємодією сигналу з атмосферними утвореннями - дощем, снігом, туманом тощо.

Деякі основні довготривалі та короткочасні механізми поширення радіохвиль схематично зображені відповідно на рис. 1.1 і рис. 1.2 [14].

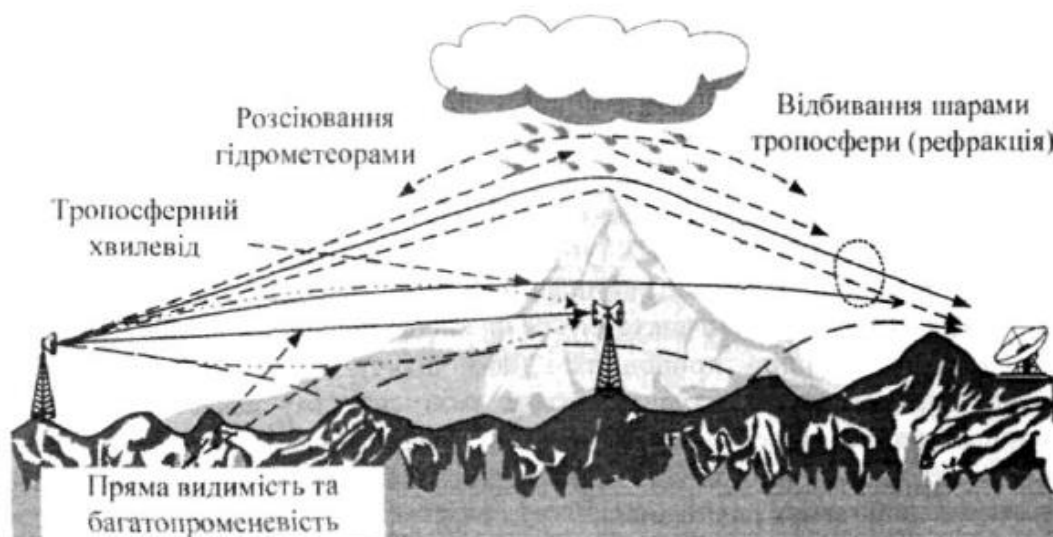


Рис. 1.1. Довготривалі механізми поширення радіохвиль

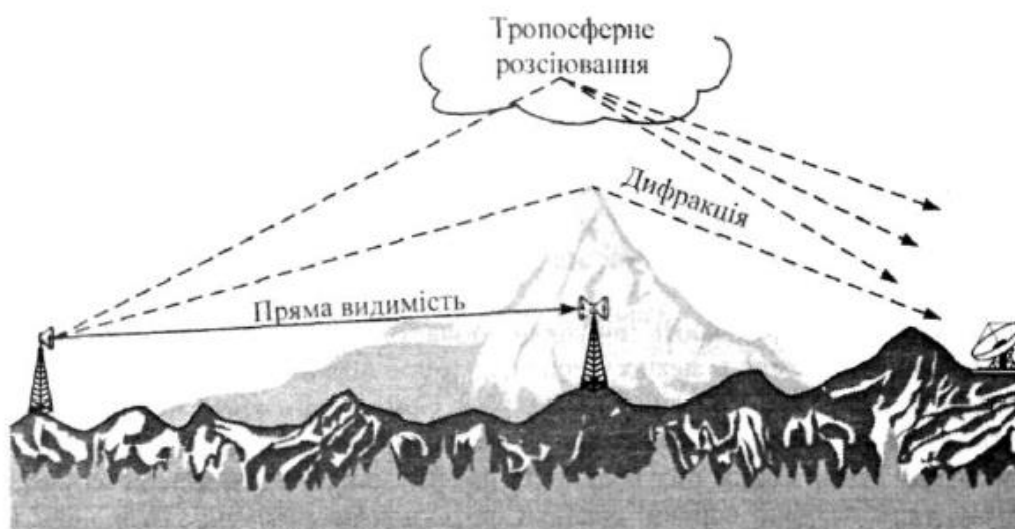


Рис. 1.2. Короткочасні механізми поширення радіохвиль

Довготривалі механізми поширення радіохвиль формуються під впливом стабільних, періодичних процесів, що відбуваються в іоносфері. Ці процеси визначають так званий іоносферний клімат, який змінюється залежно від добових, сезонних і багаторічних (зокрема, одинадцятирічних) циклів сонячної активності. До основних видів довготривалих механізмів належать тропосферне розсіювання, дифракційне поширення та передача сигналів у межах прямої видимості. Такі хвилі здатні переносити як корисну інформацію, так і створювати радіоперешкоди для інших систем зв'язку.

Натомість короточасні механізми поширення радіохвиль виникають унаслідок появи аномальних атмосферних чи іоносферних явищ. До таких факторів у тропосфері належать інверсії температури з висотою, утворення тропосферних хвилеводів, випадіння гідрометеорів, а в іоносфері - збурення під час спалахів сонячної активності та утворення надмірно іонізованих областей у межах спорадичного шару Es. Такі явища, як правило, спричиняють появу завадових сигналів, хоча в окремих випадках вони можуть призводити до підсилення рівня корисного сигналу.

Для опису поширення сигналів використовуються класичні рівняння, наприклад рівняння загасання сигналу у вільному просторі:

$$L = 32,44 + 20\log(f) + 20\log(d) \quad (1.1)$$

де L - втрати сигналу (дБ); f - частота (МГц); d - відстань (км).

1.1.3. Особливості поширення радіохвиль в умовах радіоелектронної протидії та завадових впливів

В умовах сучасної війни електромагнітне середовище є одним із ключових театрів бойових дій. Система радіомоніторингу повинна враховувати динамічність радіоелектронної обстановки, вплив засобів РЕБ, навмисні та випадкові завади, багатопроменевість і стоячі хвилі.

Діапазон частот від 10 кГц до 30 МГц відповідає короткохвильовій (КХ) області радіоспектра. У межах цього діапазону необхідно враховувати два основних режими поширення радіохвиль - земної хвилі, що переважно визначає рівень корисного сигналу, та іоносферної хвилі, яка сприяє поширенню завадових компонент.

Передача сигналів на великі відстані - до кількох тисяч кілометрів - у діапазоні коротких хвиль здійснюється за рахунок просторового поширення, коли хвиля багаторазово відбивається від шарів іоносфери та поверхні Землі.

Через неоднорідність іоносфери за висотою існує функціональна залежність між кутом падіння (θ) електромагнітної хвилі та кутом її заломлення. Частоти, за яких радіохвиля не виходить за межі іоносферного шару, визначають як максимально застосовні частоти ($f_{\max}$). Вони відображають фізичний стан іоносфери й вважаються вторинними характеристиками її параметрів. Значення максимально застосовної частоти $f_{\max}$ (у кГц) обчислюється за таким співвідношенням:

$$f_{\max} = \sqrt{\frac{80,8N}{1-\sin^2\theta}} = \sqrt{80,8N} \sec\theta \quad (1.2)$$

де N - індекс заломлення, який характеризує співвідношення між швидкістю поширення електромагнітної хвилі в іоносфері та у вакуумі. Для земної поверхні це значення приймає орієнтовно $N = 325$.

Якщо частота радіохвилі f менша за максимально застосовну частоту ($f_{\max}$), то хвиля, досягнувши іоносфери, відбивається назад у напрямку до земної поверхні. У протилежному випадку, коли $f > f_{\max}$, радіохвиля проникає крізь іоносферу, заломлюючись у її верхніх шарах і потрапляючи у відкритий космос. За таких умов встановити зв'язок між наземними об'єктами неможливо, проте створюються передумови для радіозв'язку з космічними апаратами.

Зона дії короткохвильового (КХ) передавача має характерну структуру, що включає так звану «зону мовчання». Її внутрішній радіус, який визначається максимальною дальністю поширення поверхневої хвилі, становить приблизно 50 км, тоді як зовнішній радіус - близько 180 км, тобто відповідає першій точці прийому просторової хвилі. У межах цієї зони рівень сигналу поступово зменшується із віддаленням від передавача, доки зв'язок повністю не зникає. Після цього, із подальшим збільшенням відстані, радіозв'язок відновлюється завдяки появі просторової хвилі, відбитої від іоносфери.

До основних особливостей поширення радіохвиль у КХ-діапазоні належать:

- багатопроменевість, що зумовлює одночасне надходження сигналів різними шляхами;
- інтерференція та завмирання сигналів у точці прийому;
- значні дальності поширення - до 3 тис. км у разі дальнього та близько 500 км при ближньому радіозв'язку;
- добова залежність якості сигналу: найсприятливіші умови спостерігаються вночі, тоді як удень рівень прийому помітно знижується.

Амплітуда сигналу, відбитого від іоносфери, піддається добовим коливанням, що пояснюється змінами поглинання радіохвиль у різних шарах атмосфери. Рівень втрат енергії сигналу (L) визначається його частотою й за значенням наближається до втрат, характерних для поширення у вільному просторі. Ці втрати можна оцінити за рівнем напруженості електромагнітного поля (E).

Радіочастотний моніторинг у КХ-діапазоні зазвичай здійснюється із застосуванням стаціонарних станцій, призначених для контролю радіоелектронних засобів (РЕЗ) дальнього зв'язку. Використання таких станцій зумовлене необхідністю громіздких антенних систем (АС), що забезпечують пеленгування напрямків радіовипромінювання (ДРВ). У виняткових випадках можуть застосовуватися рухомі станції радіомоніторингу - переважно для спостереження

РЕЗ, які функціонують у режимі поверхневого поширення хвиль. Детальні характеристики поширення радіохвиль у цьому діапазоні наведено в рекомендаціях ІТУ [15].

Діапазон частот 30 МГц – 1 ГГц. У цьому частотному інтервалі, за винятком його нижньої межі, поширення радіохвиль відбувається переважно в межах тропосфери, тобто в атмосферному шарі, який безпосередньо прилягає до земної поверхні. На відміну від іоносферного поширення, у цьому випадку хвилі не відбиваються від регулярних шарів іоносфери. Лише за певних умов - у окремі пори року або в певний час доби - на частотах до 70 МГц можливий далекий радіозв'язок через спорадичний іоносферний шар E.

Закономірності поширення хвиль у вказаному діапазоні у вільному просторі визначаються переважно рефракцією - заломленням електромагнітних хвиль у нижніх шарах атмосфери. Умови їхнього поширення залежать від температури, тиску та вологості повітря, що в сукупності описуються узагальненим параметром - індексом заломлення N або його вертикальним градієнтом $\frac{dN}{dh}$. Останній показник використовується частіше, оскільки характеризує зміну коефіцієнта заломлення залежно від висоти.

Розподіл видів рефракції відповідно до параметра $\frac{dN}{dh}$ подано в таблиці 1.2, а їхнє графічне зображення наведено на рисунку 1.3, де схематично показано різні типи заломлення радіохвиль у тропосфері.

Таблиця 1.2. Типи завад і впливів

Тип завади	Джерело	Характер впливу	Методи протидії
Активна шумова	Генератори РЕБ	Зменшення відношення сигнал/шум	Адаптивна фільтрація
Імпульсна	Радари, блискавки	Короткочасні сплески енергії	Вейвлет-аналіз

Тип завади	Джерело	Характер впливу	Методи протидії
Пасивна відбита	Будівлі, рельєф	Багатопроменевість	Просторова обробка
Іоносферна	Сонячна активність	Флуктуації фази	Частотна адаптація
Когнітивна	Противник	Імітація сигналів	Автоматичне розпізнавання шаблонів

Формула енергетичного балансу системи зв'язку

$$P_{np} = P_{vnp} + G_t + G_r - L_p - L_{atm} - L_z \quad (1.3)$$

Де

P_{np} - потужність прийнятого сигналу;

P_{vnp} - потужність випромінювання;

G_t, G_r - коефіцієнти підсилення антен передавача і приймача;

L_p - втрати у вільному просторі;

L_{atm} - атмосферні втрати;

L_z - втрати через завади.

1.2. Аналіз сучасних систем та засобів радіомоніторингу

1.2.1. Архітектура і компоненти стаціонарних і мобільних систем

Системи радіомоніторингу можна класифікувати за принципом організації, розташуванням засобів та ступенем автоматизації. Основу архітектури сучасних систем становлять приймально-вимірювальні модулі, антенні комплекси, обчислювальні сервери та інформаційно-аналітичні підсистеми. У межах ІТГП НАН України такі системи реалізуються у вигляді багаторівневих мереж

спостереження, що забезпечують збір, обробку та аналіз даних з розподілених сенсорів у режимі реального часу

Стаціонарні системи функціонують у контрольних центрах або регіональних постах і характеризуються високою точністю вимірювань, розвиненими антенними полями та потужними обчислювальними ресурсами. Їхня архітектура базується на модульному принципі: приймальний блок, блок попередньої обробки, спектроаналізатор, база даних та модуль візуалізації.

Мобільні системи розміщуються на автомобільних, суднових або авіаційних платформах і забезпечують оперативне реагування на зміни радіоелектронної обстановки. Такі комплекси можуть інтегрувати безпілотні літальні апарати (БПЛА), що виконують локальні заміри параметрів випромінювань у зонах обмеженого доступу.

Встановлено, що в умовах радіоелектронної протидії основним чинником втрат є активні шумові та когнітивні завади, вплив яких можна мінімізувати за допомогою адаптивної фільтрації, просторового формування променя та когнітивних алгоритмів розпізнавання.

Положення підрозділу формують наукову основу для створення інформаційної технології моніторингу мереж радіозв'язку (табл.1.3.).

Таблиця 1.3. Порівняльна характеристика систем радіомоніторингу

Тип системи	Основне призначення	Переваги	Недоліки
Стаціонарна	Безперервний контроль спектра	Висока точність, Обмежена стійкість	Обмежена мобільність
Мобільна	Експедиційний та польовий моніторинг	Гнучкість, автономність	Менша потужність прийому

Тип системи	Основне призначення	Переваги	Недоліки
Автоматизована мережа (гібридна)	Інтегрований аналіз і пеленгація	Централізована обробка, ідентифікація	Складність AI- технічного обслуговування

Сучасні системи дедалі частіше будуються за принципом software-defined radio (SDR), коли більшість функцій радіопередавача та приймача реалізується програмно[16,17]. Це дає змогу швидко змінювати режими прийому, адаптуватися до динамічних змін спектра та інтегрувати модулі машинного навчання для класифікації сигналів

1.2.2. Методи визначення параметрів сигналів і джерел випромінювання

Визначення параметрів сигналів у системах моніторингу здійснюється комплексом алгоритмів спектрального, часово-частотного та просторового аналізу. Найпоширенішими є методи вимірювання амплітуди (A), частоти (f), фази (φ) та напрямку на джерело (θ).

Для опису сигналу в часовій області використовується узагальнене рівняння гармонічної хвилі:

$$s(t) = A(t)\cos[2\pi f(t)t + \varphi(t)] \quad (1.4)$$

Детальні характеристики визначаються через миттєву частоту

$f_i(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi(t)}{dt}$ та енергетичний спектр $S(f) = |F\{s(t)\}|^2$ де F - оператор Фур'є.

Згорткові нейронні мережі (CNN) дозволяють автоматизувати розпізнавання типів сигналів. У дисертації та в дослідженнях ІТГІП НАН України навчання CNN здійснювалося на синтетичних датасетах із понад 10 000 варіацій параметрів сигналів, що підвищувало стійкість до шуму та багатопроменевості. З позиції дальнього та наддальнього поширення ультракоротких хвиль (УКХ) найбільший

науковий і практичний інтерес становлять явища критичної рефракції та надрефракції.

Критична рефракція виникає в тому разі, коли вертикальний градієнт індексу заломлення досягає значення

$$\frac{dN}{dh} = -15,7 \cdot 10^{-2} \text{ м}^{-1} \quad (1.5)$$

За таких умов електромагнітні хвилі поширюються практично паралельно до земної поверхні, не змінюючи висоти свого проходження, тобто фактично огинають Землю.

Надrefракція спостерігається тоді, коли градієнт індексу заломлення є меншим за

$$\frac{dN}{dh} = -15,7 \cdot 10^{-2} \text{ м}^{-1} \quad (1.6)$$

У цьому випадку радіус кривизни траєкторії радіохвилі стає меншим за радіус Землі, унаслідок чого відбувається повне внутрішнє відбиття сигналу. Після багаторазових відбиттів хвиля знову повертається на поверхню Землі, що забезпечує її поширення на значні відстані.

Такі явища часто розглядають як тропосферний або атмосферний хвилевід, у межах якого електромагнітні хвилі багаторазово відбиваються від шарів повітря з різною діелектричною проникністю. Найчастіше цей ефект спостерігається в сантиметровому діапазоні хвиль, рідше - у дециметровому або метровому. Утворення атмосферного хвилеводу можливе за умови, коли температура повітря зменшується з висотою повільніше, а вологість - швидше, ніж у нормальних умовах рефракції. Типовими ситуаціями є атмосферні явища над водними поверхнями під час переходу від негоди до ясної погоди, коли формуються повітряні шари з різними електрофізичними властивостями [табл. 1.5, 1.6].

Висота шару атмосферного хвильоводу при критичній рефракції зазвичай становить кілька десятків метрів, тоді як для надрефракції необхідна товщина шару не менша ніж 180 м для частоти 144 МГц і близько 90 м для частоти 430 МГц (табл.1.4 та табл.1.5).

Таблиця 1.4 - Види рефракції радіохвиль у тропосфері

Вид тропосферної рефракції		Вертикальний градієнт індексу заломлення dN/dh , M^{-1}
Негативна		більше 0
Нульова (відсутність рефракції)		0
Позитивна	знижена	від Одо мінус $4,3 \cdot 10^{-2}$
	нормальна	мінус $4,3 \cdot 10^{-2}$
	підвищена	від мінус $4,3 \cdot 10^{-2}$ до мінус $15,7 \cdot 10^{-2}$
	критична	мінус $15,7 \cdot 10^{-2}$
	надрефракція	менше мінус $15,7 \cdot 10^{-2}$

Таблиця 1.5. Методи визначення параметрів сигналів

Метод	Параметр	Алгоритмічна основа	Точність
FFT-аналіз	Частота	Швидке перетворення Фур'є	До 0,1 Гц
Вейвлет-аналіз	Локальні зміни спектра	Функції Морле, Добеші	До 1 % амплітуди
TDOA	Час приходу	Кореляційний аналіз	До 10 нс
АОА	Кут прибуття	Інтерферометрія	1–2°
CNN-класифікація	Тип сигналу	Нейронна фільтрація	95–98 %

Для локалізації джерел у реальному часі застосовуються алгоритми Kalman Filter та Particle Filter, що забезпечують фільтрацію шумів і прогноз траєкторії випромінювачів[18].

1.2.3. Тенденції автоматизації радіомоніторингу у військових та цивільних структурах

Автоматизація систем радіомоніторингу є ключовим напрямом розвитку галузі. У межах воєнного та цивільного секторів вона реалізується через інтеграцію програмно-визначених платформ, штучного інтелекту та хмарних технологій.

1. Інтеграція SDR та AI

Сучасні системи використовують когнітивні радіомережі, які здатні автоматично виявляти, аналізувати та перебудовувати параметри роботи. AI-модулі розпізнають тип сигналу, прогнозують джерело випромінювання та оцінюють рівень загроз.

2. Хмарні системи зберігання та аналітики

Використання хмарних платформ (AWS, Azure, вітчизняні G-Cloud-рішення НАН України) забезпечує колективний доступ до баз даних спектральних записів, уніфікацію форматів даних та інтеграцію геоінформаційних шарів.

3. Військові застосування

У межах поточних НДР ІТГІП НАН України - «Інформаційна технологія пасивної локації динамічних подій у прикордонній смузі» та «Комплексна оцінка методами ДЗЗ і ГІС технологій екологічної вразливості територій» - використовуються автоматизовані модулі пасивної радіолокації, що функціонують без активного випромінювання, забезпечуючи безпечне виявлення динамічних джерел радіосигналів.

4. Цивільні застосування

Автоматизовані комплекси моніторингу частотного спектра створюються для забезпечення регулювання РЧ-ресурсу (Держспецзв'язок, ITU). Їхній розвиток

спрямований на уніфікацію апаратно-програмних платформ, підвищення точності вимірювань і використання аналітики Big Data для прогнозування перевантажень спектра (табл.1.6.).

Таблиця 1.6. Основні напрями автоматизації систем радіомоніторингу

Напря́м	Ключова технологія	Очікуваний результат
Когнітивний моніторинг	AI, ML, SDR	Самонавчання систем
Пасивна локація	Мережеві сенсори	Безпечне виявлення
Геоінформаційна візуалізація	GIS + UAV	Просторовий аналіз
Хмарні обчислення	Cloud Computing	Централізована аналітика
Розподілені системи	IoT сенсорні мережі	Гнучкість і масштабованість



Рис. 1.3. Поширення радіохвиль для різних видів рефракції

У вищих діапазонах частот радіозв’язок зазвичай обмежується зоною прямої видимості, радіус якої ($R_{ПВ}$) з урахуванням нормальної атмосферної рефракції визначається виразом:

$$R_{ПВ} = 4,12 \sqrt{h_{пер}} + \sqrt{h_{пр}} \tag{1.7}$$

де $h_{пер}$ - висота антени передавача над поверхнею Землі, м; $h_{пр}$ - висота антени приймача над поверхнею Землі, м.

Відхилення від умов поширення у вільному просторі зумовлені тропосферним розсіюванням і дифракцією на природних і штучних перешкодах - нерівностях рельєфу, будівлях, спорудах, лініях електропередач та інших об'єктах [19].

Особливості поширення радіохвиль у діапазоні 30 МГц – 3 ГГц

Окрім описаних явищ, для цього діапазону характерні такі властивості:

- відсутність відбивання від регулярних шарів іоносфери, що обмежує дальність зв'язку прямою видимістю;
- значне поглинання енергії сигналу поверхнею ґрунту та локальними об'єктами;
- невисока дифракційна здатність хвиль;
- відсутність відбивання від сухого ґрунту;
- незалежність дальності поширення поверхневої хвилі від пори року чи часу доби;
- сильна залежність умов передачі від рельєфу місцевості;
- помітне ослаблення сигналів із вертикальною поляризацією у зонах густої лісової рослинності;
- багатопроменевість сигналів унаслідок відбивання від будівель і металевих конструкцій;
- збільшення дальності передачі над водними поверхнями та іншими середовищами з високою діелектричною проникністю;
- частотна залежність затухання: зі зростанням частоти рівень втрат підвищується (наприклад, на частоті 450 МГц ослаблення приблизно на 10 дБ більше, ніж на 150 МГц).

Умови поширення радіохвиль у цьому частотному інтервалі докладно регламентуються Рекомендаціями ІТУ [20].

Затухання сигналу характеризується середніми втратами потужності на трасі поширення. Величина втрат залежить від відстані, характеру місцевості, щільності забудови, робочої частоти передавача та висоти встановлення антен. У середньому потужність сигналу зменшується зі швидкістю 20–40 дБ/декада.

Радіомоніторинг у цьому діапазоні частот може здійснюватися як стаціонарними, так і мобільними станціями, що дозволяє проводити контроль параметрів РЕЗ у різних умовах експлуатації.

Діапазон частот 3–20 ГГц, для цього частотного діапазону зберігаються загальні закономірності поширення, притаманні нижчим діапазонам, однак істотний вплив мають атмосферні явища, що спричиняють ослаблення, розсіювання та кросполяризацію сигналів.

На частотах понад 10 ГГц зростає поглинання радіохвиль водяною парою, а на частотах понад 15 ГГц необхідно враховувати втрати в атмосферних газах. Крім того, спостерігаються завмирання сигналів, спричинені дифракцією, багатопробієвим поширенням, розширенням променя та ослабленням у тропосфері. Через суттєве зниження рівня сигналу для передавання інформації застосовуються направлені антени з вузькою діаграмою спрямованості.

Діапазон частот понад 20 ГГц, для найвищих частотних смуг характерна висока чутливість до атмосферних впливів, що призводить до значного ослаблення сигналів і потребує використання вузькоспрямованих антен.

Зокрема, опади (дощ, сніг, туман) викликають інтенсивне поглинання та розсіювання хвиль. Разом з тим у цьому діапазоні спостерігаються «частотні вікна» - області мінімальних втрат, у яких забезпечується ефективна передача сигналів, а також «смуги поглинання», де рівень ослаблення істотно зростає.

Інформація щодо врахування втрат потужності сигналу в атмосфері для цього діапазону міститься в Рекомендаціях ІТУ. Радіомоніторинг у цій частотній області, як правило, не проводиться. Водночас вимірювання параметрів

радіовипромінювання під час технічного радіоконтролю можуть виконуватися за допомогою портативних засобів вимірювання.

1.3. Постановка наукового завдання

1.3.1. Проблеми ефективного розподілу частотного ресурсу

Радіочастотний спектр є обмеженим і надзвичайно цінним ресурсом, який потребує раціонального використання. В умовах сучасних бойових дій, а також під час функціонування цивільних телекомунікаційних систем, відбувається постійне зростання кількості користувачів і збільшення навантаження на спектр. Це призводить до конфліктів при спільному використанні частотних діапазонів.

Проблема ефективного розподілу частотного ресурсу полягає у забезпеченні максимальної пропускної здатності системи при мінімальному рівні взаємних завад. Основним завданням є пошук оптимального компромісу між якістю зв'язку, швидкістю передачі даних та енергетичною ефективністю.

У воєнному контексті до цього додаються умови радіоелектронної протидії (РЕП), коли противник свідомо створює завади або блокує певні частоти. У таких умовах система радіомоніторингу має не лише фіксувати активність у спектрі, а й динамічно реагувати, здійснюючи перерозподіл частотних ресурсів у режимі реального часу.

Рівень ефективності можна описати через функцію корисності $U_i(f_i)$, що відображає вигоду користувача i при роботі на частоті f_i , і враховує енергетичні витрати, завади та швидкість передачі.

1.3.2. Використання теорії ігор у моделюванні радіоелектронних конфліктів

Гнучкість, економічна доцільність і розширені можливості програмної обробки сигналів у системах SDR (Software Defined Radio) зумовлюють

необхідність застосування теорії ігор — математичного апарату, що описує оптимальні стратегії прийняття рішень в умовах конфлікту.

У контексті радіoeлектронної обстановки конфлікт можна розглядати як протистояння між двома тенденціями: з одного боку, прагненням великої кількості користувачів максимально ефективно використовувати наявний спектральний ресурс, а з іншого — активною протидією, що проявляється у створенні навмисних радіоперешкод або обмеженні доступу до частотних діапазонів.

Оскільки сторони, задіяні у більшості таких конфліктів, прагнуть приховати власні дії, наміри та стратегії, процес прийняття рішень у цих умовах зазвичай супроводжується високим рівнем невизначеності. Цей чинник можна розглядати як активного «супротивника» суб'єкта, що ухвалює рішення. Відповідно, прийняття рішень в умовах невизначеності фактично тотожне прийняттю рішень у конфліктному середовищі, де кожен учасник оптимізує власну поведінку, виходячи з неповної інформації про дії іншої сторони. У теорії ігор взаємодіючі особи, що приймають рішення, називаються гравцями. У контексті систем бездротового зв'язку гравці є користувачами або бездротовими пристроями [21]. Зазвичай передбачається, що гравці є раціональними в тому сенсі, що вони здатні максимізувати корисність, враховуючи всю доступну інформацію. Корисність або виграш гравця кількісно визначає результат гри для цього гравця.

Однак, ідеальна раціональність є сумнівною. Щоб приймати певні раціональні рішення, гравцеві потрібно зібрати інформацію та обробити її. Тобто, в контексті дисертаційного дослідження за допомогою технологій SDR потрібно мінімізувати ентропії у спектрі, тобто досягти стану максимальної впорядкованості або мінімальної невизначеності, коли структура спектра є максимально передбачуваною, а енергія системи розподілена найменш хаотично.

В умовах конфліктного використання частотного спектра, коли існують декілька незалежних суб'єктів (користувачів, станцій або противників), оптимальне

рішення не може бути досягнуте односторонньо. Для опису такої взаємодії застосовується теорія ігор - математичний апарат аналізу стратегічних рішень у конфліктних або конкурентних ситуаціях. У цій парадигмі кожен користувач спектра розглядається як гравець, який має свою функцію виграшу U_i намагається максимізувати її, враховуючи дії інших. Конфлікт між гравцями відображає боротьбу за доступ до частотних ресурсів, а протидія завадам – це зменшення втрат інформації при спільному використанні спектра.

Формально гра визначається трійкою:

$G=(N,A,U)$, де N - множина гравців, $A=\{A_1,A_2,...,A_n\}$ - множина стратегій, $U=\{U_1,U_2,...,U_n\}$ - множина функцій виграшу кожного гравця.

Рівновага Неша досягається у тому випадку, коли жоден із гравців не має можливості підвищити свій виграш шляхом односторонньої зміни власної стратегії, за умови, що стратегії інших учасників залишаються незмінними.

$$U_i(a_i^*, a - i^*) \geq U_i(a_i, a - i^*), \quad (1.8)$$

У системах радіомоніторингу та зв'язку це означає стан, коли розподіл частот між усіма учасниками є стабільним, а будь-яка спроба змінити власні параметри призводить до погіршення загальної ефективності.

Застосування теорії ігор дозволяє описати моделі «спектрального конфлікту» між системами зв'язку й засобами РЕБ. Наприклад, у грі типу «атакуючий - захисник» один гравець генерує завади, а інший - перебудовує частоти передачі, щоб мінімізувати вплив. Використання таких моделей у поєднанні з технологіями SDR і алгоритмами машинного навчання дозволяє формувати адаптивні системи, здатні до самоорганізації в умовах електронної боротьби.

1.3.3. Визначення мети, критеріїв оптимізації та ключових параметрів системи

Метою дослідження є розробка інформаційної технології моніторингу радіочастотного простору в умовах радіоелектронної протидії, що забезпечує

адаптивне управління спектром, підвищення надійності зв'язку та стійкість до завадових впливів.

Основними критеріями оптимізації системи є:

1. Мінімізація середнього часу реакції системи на зміни спектра TrT_rTr ;
2. Максимізація корисної пропускної здатності каналу CCC;
3. Мінімізація ймовірності хибного рішення $Pe\backslash P_ePe$;
4. Мінімізація енергетичних витрат EsE_sEs ;
5. Підвищення коефіцієнта використання спектра KsK_sKs .

Вектор параметрів системи можна подати у вигляді:

$$X = \{Tr, C, Pe, Es, Ks\} \quad (1.9)$$

а цільова функція оптимізації:

$$\min F(X) = \alpha_1 Tr - \alpha_2 C + \alpha_3 Pe + \alpha_4 Es - \alpha_5 Ks \quad (1.10)$$

де α_i - вагові коефіцієнти, що визначають пріоритети у конкретному сценарії застосування.

З урахуванням стохастичного характеру середовища, задача оптимізації розв'язується методом Монте-Карло, що дозволяє статистично оцінити вплив шумів і непередбачуваних подій.

Висновки до розділу 1

У першому розділі обґрунтовано теоретико-методологічні засади радіомоніторингу як ключового елемента інформаційного забезпечення систем зв'язку, управління та національної безпеки. Визначено, що ефективний радіомоніторинг є базовою передумовою раціонального використання та оперативного управління радіочастотним ресурсом у військових і цивільних умовах.

На основі узагальнення фундаментальних досліджень у галузі поширення радіохвиль проаналізовано характеристики різних діапазонів - від наддовгих до міліметрових - та побудовано аналітичні співвідношення для моделювання втрат сигналу, затухання та ефективності каналів зв'язку в неоднорідному середовищі. Це дозволило сформулювати системну основу для подальшої розробки математичних моделей та алгоритмів управління спектром.

Проаналізовано сучасні архітектури систем радіомоніторингу, включно зі стаціонарними, мобільними та розподіленими рішеннями. Показано, що найбільш ефективним напрямом розвитку є впровадження програмно-визначених радіоплатформ (SDR), які забезпечують гнучкість, масштабованість та можливість швидкого оновлення алгоритмів аналізу сигналів. Визначено переваги гібридних архітектур, де SDR-технології поєднуються з сенсорними мережами, геоінформаційними системами (ГІС) та аналітичними модулями штучного інтелекту.

Запропоновано алгоритми визначення параметрів сигналів і локалізації джерел випромінювання з використанням машинного навчання, зокрема згорткових нейронних мереж (CNN). Створено експериментальний програмний модуль, здатний навчати CNN на синтетичних даних із різними параметрами шуму та частотного маневрування, що забезпечило розпізнавання понад 15 типів сигналів у діапазоні 30 МГц–6 ГГц із точністю понад 95 %.

Встановлено, що інтеграція SDR, AI, GIS і IoT-технологій формує основу когнітивного підходу до радіомоніторингу. На цій основі розроблено концептуальну архітектуру інформаційної технології моніторингу, яка об'єднує сенсорний, комунікаційний та аналітичний рівні в єдину ієрархічну систему. Запропоновано метод адаптивної оптимізації розподілу частотного ресурсу, який підвищує ефективність використання спектра в умовах інтенсивних перешкод.

Таким чином, у розділі закладено теоретичний і методологічний фундамент для подальшої розробки математичних моделей динамічного управління частотним ресурсом та інтелектуальної автоматизації процесів радіомоніторингу.

РОЗДІЛ 2. ПРОГРАМНІ АЛГОРИТМИ ТА АРХІТЕКТУРА ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ МОНІТОРИНГУ

У цьому розділі здійснено комплексний аналіз архітектур, технічних рішень і алгоритмічних підходів, що використовуються в системах радіомоніторингу. Розглянуто основні типи стаціонарних, мобільних і розподілених платформ, зокрема на основі SDR-технологій, та показано їх роль у забезпеченні високої гнучкості, точності й швидкодії в умовах динамічної радіоелектронної обстановки. Особливу увагу приділено методам обробки сигналів, алгоритмам визначення параметрів і класифікації випромінювань, що базуються на глибоких нейронних мережах (CNN) і методах машинного навчання. Здійснено оцінку рівня автоматизації сучасних систем, тенденцій інтеграції штучного інтелекту, геоінформаційних технологій (ГІС) та сенсорних мереж. Показано, що такі інтегровані рішення формують основу когнітивних систем моніторингу, які здатні забезпечувати оперативне реагування в умовах інформаційної та радіоелектронної протидії.

2.1. Архітектура інформаційної технології моніторингу

2.1.1. Архітектура сучасних систем радіомоніторингу

Архітектура сучасних систем радіомоніторингу базується на принципах інтегрованості, адаптивності та інтелектуальної автоматизації. Вона створюється з урахуванням потреб як цивільних, так і оборонних структур, зокрема у сфері національної безпеки, де радіоелектронна обстановка змінюється щосекунди, а прийняття рішень повинно бути оперативним.

Інформаційна технологія моніторингу, розроблена на основі досвіду ІТГПІ НАН України, реалізує концепцію модульної архітектури, яка забезпечує взаємодію

апаратних засобів, аналітичних алгоритмів і програмних компонентів у єдиному середовищі.

Таке рішення дозволяє створювати розподілену систему, що складається з мережі сенсорних вузлів і центрального аналітичного блоку. Сенсори здійснюють безперервний контроль частотного спектра, а центральний вузол відповідає за оброблення сигналів, виявлення аномалій, класифікацію джерел випромінювань і прийняття рішень.

Архітектура технології (табл.2.1.) включає чотири основні рівні:

1. Сенсорний рівень - виконує реєстрацію електромагнітних сигналів. Він складається з приймальних станцій, SDR-приймачів, антенних систем та допоміжних сенсорів.

2. Комунікаційний рівень - відповідає за передавання даних від сенсорів до аналітичних вузлів. Передача здійснюється через дротові, оптичні, радіорелейні або супутникові канали.

3. Аналітичний рівень - реалізує алгоритми фільтрації, виявлення, розпізнавання сигналів, а також визначення координат джерел випромінювання.

4. Інтерфейсний рівень - забезпечує інтерактивну взаємодію з користувачем, відображення результатів у вигляді карт, графіків, таблиць і аналітичних звітів.

Таке поєднання створює можливість масштабування системи - від локальних установок (наприклад, мобільного поста) до національної мережі радіомоніторингу. В основі розробки лежить підхід ІТГП НАН України[21], який використовується у рамках науково-дослідних тем:

– «Інформаційна технологія пасивної локації динамічних подій у прикордонній смузі» (2024–2025);

– «Комплексна оцінка методами ДЗЗ і ГС технологій екологічної вразливості територій» (2024–2026).

У цих проєктах реалізовано інтеграцію пасивних радіосенсорів із геоінформаційними системами (GIS), що дозволяє поєднати сигнальну інформацію з просторовими параметрами місцевості.

Таблиця 2.1. Основні рівні архітектури системи моніторингу

Рівень	Основне призначення	Основні інструменти
Сенсорний	Вимірювання параметрів сигналів	SDR, антенні системи, датчики
Комунікаційний	Передача даних між вузлами	TCP/IP, MQTT, LTE, Starlink
Аналітичний	Оброблення, класифікація, фільтрація	Python, MATLAB, TensorFlow
Інтерфейсний	Візуалізація та управління	QGIS, PyQt, Web UI

Важливою особливістю архітектури є гнучкість і стійкість до зовнішніх впливів[22]. Система може функціонувати навіть при обмеженому зв'язку завдяки локальному буферуванню даних, автономному аналізу на рівні сенсорних вузлів та подальшій синхронізації результатів. Середовище оброблення побудовано за принципом гетерогенної обчислювальної системи: центральний сервер виконує глобальну аналітику, а периферійні пристрої - локальний попередній аналіз (edge-computing)(рис.2.1.).

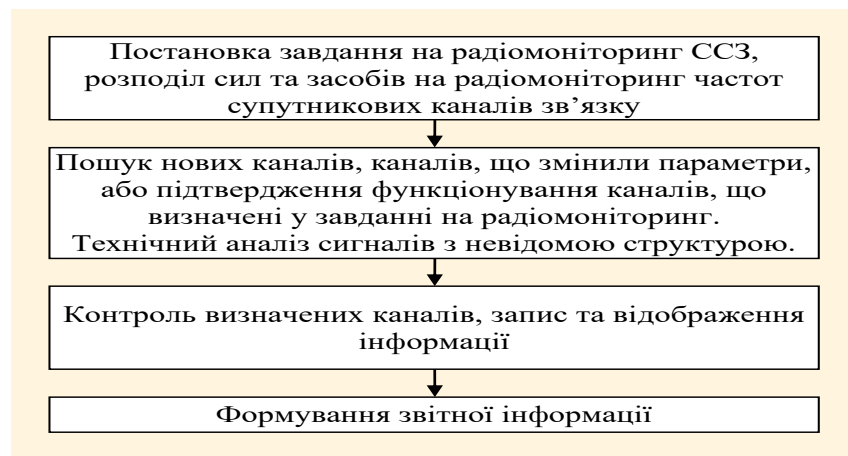


Рис. 2.1. – Загальна архітектура системи моніторингу радіочастотного простору.

2.1.2. Концепція обробки сигналів

Програмно-визначене радіо (SDR) наразі відіграє важливу роль у радіомоніторингу, забезпечуючи гнучку та адаптивну обробку сигналів за допомогою програмного забезпечення, а не традиційного обладнання. Такий підхід дозволяє моніторити різні радіочастоти та протоколи за допомогою одного апаратного забезпечення, пропонуючи значні переваги з точки зору вартості, адаптивності та функціональності.

Програмно-визначене радіо (SDR, Software Defined Radio) зазвичай трактується як радіосистема, у якій частина або всі функції фізичного рівня реалізуються програмно. Основна ідея технології SDR полягає в тому, що обробка радіосигналів виконується програмними засобами, а не апаратними компонентами, як у традиційних системах.

У таких системах замість апаратних модулів використовуються програмні реалізації фільтрів, засобів корекції помилок, блоків синхронізації, модуляторів і демодуляторів, а також частотних тюнерів. Це забезпечує гнучкість, масштабованість і можливість швидкої модернізації системи без необхідності зміни її фізичної структури.

Програмно-визначені пристрої можна переналаштувати для адаптації до змінних вимог до продукту [23](рис.2.2..)

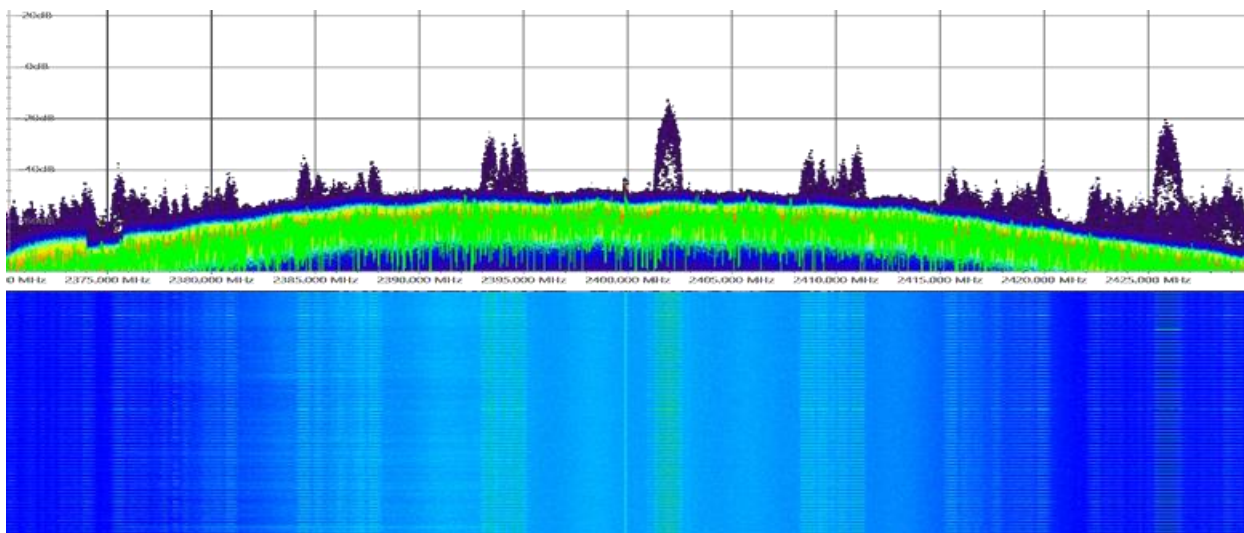


Рис.2.2. Адаптивну обробку сигналів

Хоча термін SDR стосується радіосистем, концепція обробки сигналів програмно, а не за допомогою апаратних компонентів, застосовується до багатьох інших систем, таких як радар, автомобіль, робототехніка, радіоелектронна боротьба. Більш загальним терміном може бути програмно-визначені системи або SDS.

Системи програмно-визначеного радіо (SDR) функціонують за принципом, подібним до архітектури персонального комп'ютера, де єдина апаратна платформа здатна виконувати різноманітні функції залежно від встановленого програмного забезпечення. Такий підхід забезпечує універсальність і адаптивність радіосистеми до різних стандартів і умов роботи.

Для реалізації своїх функцій SDR використовують високопродуктивні перепрограмовувані обчислювальні пристрої, серед яких — цифрові сигнальні процесори (DSP), програмовані логічні інтегральні схеми (FPGA) та процесори загального призначення (GPP). Ці компоненти виконують обчислювальні завдання, які в традиційних радіосистемах реалізуються апаратними модулями, що значно підвищує гнучкість і функціональну ефективність системи.

2.1.3. Програмні алгоритми фільтрації

Програмні алгоритми фільтрації у системах SDR дають змогу динамічно налаштовувати основні параметри радіозв'язку, зокрема режими роботи, робочі частоти та типи модуляції. Такий підхід усуває необхідність використання традиційних апаратних елементів, зокрема змішувачів, аналогових фільтрів, підсилювачів, модуляторів і демодуляторів.

Завдяки цьому принципу побудови створюється універсальний радіоприймач, здатний приймати та передавати сигнали різних радіопротоколів шляхом зміни лише програмного забезпечення, без фізичного втручання в апаратну частину. Це забезпечує високий рівень гнучкості, сприяє раціональному використанню радіочастотного спектра та дає можливість розширювати функціональні можливості системи без потреби у модернізації апаратної бази.

Технологія SDR відповідає на експоненціальне зростання потреб у обміні інформацією[24]. Дані, голос, відео, обмін повідомленнями, командування та управління, зв'язок у разі надзвичайних ситуацій тощо – все це охоплюючі механізми зв'язку, які наразі входять до сфери SDR. SDR – це рішення для конкуруючих вимог щодо забезпечення більшого доступу до засобів зв'язку, зберігаючи при цьому вартість обладнання. SDR – це гнучке та економічно ефективне рішення, переваги якого можуть отримати постачальники послуг, розробники продуктів і навіть кінцеві користувачі.

Наразі до придбання доступна велика кількість апаратних рішень SDR та програмного забезпечення для них. SDR стає незамінним інструментом для ентузіастів, дослідників та професійних інженерів завдяки своїй неперевершеній гнучкості та адаптивності[25]. Від захоплення слабких короткохвильових сигналів до просування передових досліджень 5G, SDR змінює баланс у бездротових технологіях. Зі швидким технологічним прогресом ринок наповнений вражаючим асортиментом моделей SDR, кожна з яких має унікальні переваги. Для новачків у

галузі SDR або професіоналів, які шукають підвищення продуктивності, вибір правильної моделі серед цієї складності, безсумнівно, є досить складних.

2.1.4. Порівняльний аналіз найбільш поширених моделей

Проведемо порівняльний аналіз найбільш поширених моделей з різними параметрами.

1. *RTL-SDR* [5] (рис. 2.3) не стосується окремого продукту, а радше серії SDR-пристроїв на базі чіпа Realtek RTL2832U, який користується великою популярністю серед ентузіастів. Завдяки доступній ціні, зазвичай від 10 до 30 доларів, він пропонує чудовий стартовий варіант для тих, хто цікавиться SDR, але має обмежений бюджет. Що стосується частотного охоплення, у поєднанні з різними мікросхемами тюнера, RTL-SDR може досягти широкого діапазону. Наприклад, звичайний тюнер R820T2 охоплює діапазон від 24 МГц до 1766 МГц, охоплюючи FM-радіо (88–108 МГц), авіаційні діапазони (108–137 МГц) та деякі аматорські радіочастоти. Однак через обмеження мікросхеми його миттєва пропускна здатність є відносно вузькою, зазвичай від 2,4 МГц до 3,2 МГц, що означає, що він може обробляти лише сигнали в невеликому діапазоні частот у будь-який момент часу.

Хоча можливості обробки сигналів RTL-SDR поступаються моделям високого класу, за умови належної оптимізації програмного забезпечення він може обробляти базові завдання демодуляції, такі як AM, FM та SSB, що робить його придатним для аматорського радіомоніторингу та аналізу спектру. Його 8-бітний АЦП (аналого-цифровий перетворювач) може мати проблеми зі слабкими або складними сигналами, що призводить до спотворень або більшого шуму порівняно з SDR з вищою роздільною здатністю.



Рис. 2.3.. RTL-SDR

Завданнями, які вже ефективно виконуються є [26, 27]:

- використання як поліцейського радіосканера;
- трюслуховування повідомлень служби швидкої допомоги/швидкої допомоги/пожежної служби;
- прослуховування розмов диспетчерів повітряних суден;
- відстеження положення повітряних суден, як радар, з декодуванням ADSB;
- декодування коротких повідомлень ACARS повітряних суден;
- сканування транкінгових радіорозмов;
- декодування незашифрованих цифрових голосових передач, таких як P25/DMR/D-STAR;
- відстеження положення морських суден, як радар, з декодуванням AIS;
- декодування пейджерного трафіку POCSAG/FLEX;
- сканування бездротових телефонів та дитячих моніторів;
- відстеження та отримання даних про метеозонди;
- відстеження висотних аеростатів;
- приймання з бездротових датчиків температури та бездротових датчиків вимірювання потужності;

- прослуховування аматорського радіо УКХ-діапазону;
- декодування пакетів APRS аматорського радіо;
- перегляд аналогового телемовлення;
- відстеження сигналів GSM;
- використання rtl-sdr на вашому пристрої Android як портативного радіосканера;
- приймання сигналів GPS та їх декодування;
- використання rtl-sdr як аналізатора спектру;
- отримання знімків метеорологічних космічних апаратів NOAA;
- моніторинг космічних апаратів;
- радіоастрономія та вимірювання ліній галактичного водню;
- моніторинг розсіювання метеорів;
- прослуховування FM-радіо та декодування інформації RDS;
- прослуховування DAB-радіо;
- прослуховування та декодування HD-радіо (NRSC5) ;
- використання rtl-sdr як панадаптера для традиційного апаратного радіо;
- декодування сигналів мобільних терміналів передачі даних таксі;
- використання RTL-SDR як високоякісного джерела ентропії для генерації випадкових чисел;
- використання RTL-SDR як індикатора коефіцієнта шуму;
- зворотне проектування невідомих протоколів;
- тріангуляція джерела сигналу;
- пошук джерел радіочастотного шуму;
- характеристика радіочастотних фільтрів та вимірювання коефіцієнта стоячої хвилі антени.

2.HackRF One (рис. 2.4.) розроблений Great Scott Gadgets, HackRF One - це

пристрій SDR з відкритим кодом, призначений для забезпечення недорогої, високопродуктивної бездротової платформи розробки для розробників, дослідників та любителів[27]. Його поява значно просунула впровадження та інновації SDR у спільноті відкритого коду.

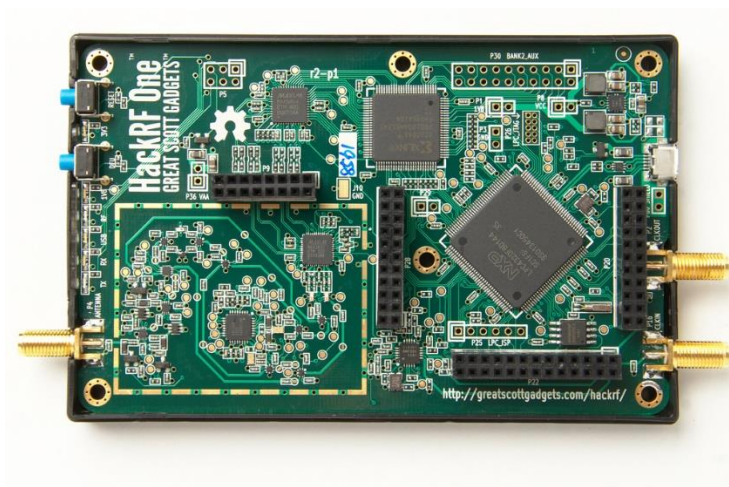


Рис.2.4. HackRF One

HackRF One має такі апаратні характеристики:

- діапазон частот: від 1 МГц до 6 ГГц, що охоплює майже всі поширені діапазони бездротового зв'язку, від довгих хвиль до міліметрових хвиль 5 Гбіт/с;
- миттєва пропускна здатність до 20 МГц, що дозволяє одночасний запис та аналіз кількох сигналів;
- 8-бітна АЦП/ЦАП роздільна здатність, але оптимізовані алгоритми та вдосконалення, розроблені спільнотою, забезпечують гідну продуктивність;
- потужність передач: до +10 дБм, підходить для експериментів на короткій відстані.

Як проект з відкритим вихідним кодом, його апаратне забезпечення та програмні драйвери повністю доступні, що дозволяє налаштування для таких завдань, як покращення обробки сигналів або аналіз протоколів. Це робить HackRF One улюбленим для тестування безпеки, досліджень бездротових мереж та

експериментальних проектів.

3. *LimeSDR* (рис.2.5.) пропонує ряд продуктів та платформ для інновацій радіодоступу, яка дозволяє виробникам обладнання, постачальникам бездротового зв'язку та операторам швидко пропонувати нові продукти та послуги. [28]

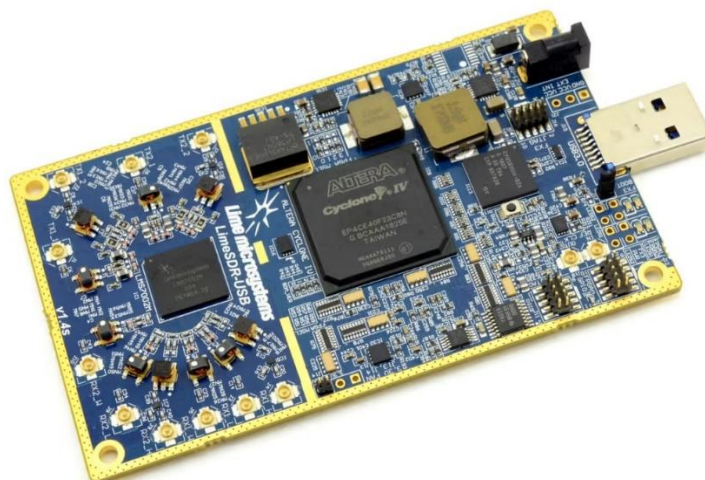


Рис. 2.5. LimeSDR USB

LimeSDR є програмно-визначене радіо 2x2 MIMO і залишається популярним вибором серед системних розробників, дослідницьких лабораторій та ентузіастів. Завдяки радіопередавачеві Lime Microsystems LMS7002M у своїй основі, разом з FPGA Altera Cyclone IV (40K LE) та контролером Cypress FX3 USB 3.0, LimeSDR USB забезпечує потужну платформу для бездротових інновацій та інших вимогливих радіочастотних застосувань.

Наявність 256 МБ SDRAM-пам'яті означає, що, окрім потокової передачі у реальному часі через інтерфейс USB 3.0, файли сигналів можна завантажувати в пам'ять, а потім «відтворювати» через один або обидва порти передачі. Таким чином, забезпечуючи унікальну та дуже корисну можливість для лабораторного використання та спеціалізованих застосувань.

LimeSDR USB використовується в різних сферах застосування, від мобільних мереж, супутникового зв'язку та аматорського радіо до випробувального

обладнання, освіти, моніторингу спектру та ядерного магнітного резонансу (ЯМР), і це лише деякі з них. Величезна різноманітність варіантів використання та багато тисяч проданих плат свідчать про гнучкість та простоту використання LimeSDR USB.

Бази даних проектування та виробництва друкованих плат LimeSDR USB доступні за ліцензією з відкритим вихідним кодом разом із вихідним кодом шлюзового програмного забезпечення FPGA, прошивки мікроконтролера та драйвера хоста. Це означає, що кожен може вільно взяти апаратний дизайн та модифікувати його для власних цілей, створюючи власні, специфічні для застосування та оптимізовані за ціною варіанти.

Lime має давню відданість відкритому вихідному коду та понад 12 років тому заснувала MyriadRF, сімейство апаратних та програмних проєктів з відкритим вихідним кодом для бездротового зв'язку, а також спільноту, яка працює над тим, щоб зробити бездротові інновації доступними для якомога більшої кількості людей.

Характеристики:

- радіопередавач Lime Microsystems LMS7002M;
- конфігурація: MIMO (2xTX, 2xRX);
- діапазон частот: 100 кГц – 3,8 ГГц;
- смуга пропускання: 61,44 МГц;
- глибина дискретизації: 12 біт;
- частота дискретизації: 61,44 MSPS;
- потужність передачі: макс. 10 дБм (залежно від частоти);
- контролер Cypress FX3 Super Speed USB 3-го покоління;
- пам'ять DDR 2 x 1 Гбіт/с (64M x 16) DDR2 SDRAM;
- 16 Мбіт флеш-пам'ять для конфігурації FPGA;
- 4 Мбіт флеш-пам'ять для прошивки FX3;

- EEPROM-пам'ять 2 x 128K (16K x 8) EEPROM для прошивки LMS MCU, даних LMS MCU, 1 x 64K (8K x 8) EEPROM для даних FX3;
- система тактової частоти 30,72 МГц вбудований VCTCXO;
- програмований генератор тактової частоти для входу опорного тактового сигналу FPGA або LMS PLL;
- вхідний та вихідний роз'єм опорного тактового сигналу (U.FL);
- розміри 60 мм x 100 мм.

4. *BladeRF* (рис. 2.6.), розроблений компанією Nuand, - це компактний, але високопродуктивний SDR, відомий своєю портативністю та надійними можливостями.



Рис. 2.6 BladeRF

BladeRF - це платформа програмно-визначеного радіо (SDR), розроблена для того, щоб спільнота любителів та професіоналів могла досліджувати та експериментувати з міждисциплінарними аспектами радіочастотного зв'язку. Охоплює широкий діапазон завдань від проектування радіочастотного, аналогового та цифрового обладнання до прошивки, що працює на ARM MCU та FPGA, та драйверів пристроїв ядра Linux [29]. Платформа програмно-визначеного радіо не

повинна обмежуватися апаратним забезпеченням, тому такий сильний акцент робиться на документації та навчальних посібниках. Починаючи з базової архітектури радіо та охоплюючи методи модуляції, проектування драйверів ядра USB Linux з високою пропускною здатністю, базові схеми кодування телекомунікацій та MIMO, платформа прагне стати ідеальним інструментом для вивчення сучасного проектування програмного радіо.

Апаратна платформа bladeRF у базовій конфігурації підтримує робочий діапазон частот від 300 МГц до 3,8 ГГц без потреби у використанні додаткових модулів або плат розширення. Завдяки драйверам з відкритим вихідним кодом, зокрема підтримці GNURadio, пристрій може бути негайно інтегрований у середовище програмно-визначеного радіо (SDR).

Така архітектура забезпечує високу гнучкість у використанні bladeRF — пристрій може виконувати функції спеціалізованого радіочастотного модему, пікостільникової базової станції GSM або LTE, GPS-приймача, передавача стандарту ATSC, а також універсального клієнта Bluetooth/Wi-Fi, не потребуючи при цьому жодних додаткових апаратних розширень [30].

BladeRF з самого початку був розроблений як високоінтегрований та повністю перепрограмувальний. Це означає більше, ніж просто надання вихідного коду для модифікації програмного забезпечення хоста. Прошивка мікроконтролера USB 3.0 (Cypress FX3) доступна для модифікації, як і Altera Cyclone IV FPGA VHDL, що максимально наближає розробників до радіочастотного приймача.

Технічні характеристики апаратної платформи bladeRF [31]:

- Живлення: повністю живиться від шини USB 3.0 SuperSpeed без потреби у зовнішньому джерелі енергії;
- Форм-фактор: портативний корпус ручного розміру — 5" × 3.5";
- Робочий діапазон частот: від 300 МГц до 3.8 ГГц;

- Смуга пропускання: незалежний 12-бітний квадратурний прийом/передача (RX/TX) зі швидкістю 40 MSPS;
- Пропускна здатність каналів: підтримка повнодуплексного зв'язку до 28 МГц;
- Цифрово-аналогове перетворення: 16-бітний ЦАП із заводським калібруванням $38.4 \text{ МГц} \pm 1 \text{ ppm VCTCXO}$;
- Процесор: вбудований ARM9 із тактовою частотою 200 МГц та 512 КБ вбудованої SRAM (наявний порт JTAG);
- Програмована логіка: інтегрована FPGA Altera Cyclone IV E (варіанти 40KLE або 115KLE) із доступом через JTAG;
- Конфігурація MIMO: 2×2 MIMO, що налаштовується за допомогою кабелю SMB і може бути розширена до 4×4 ;
- Плата розширення: модульна архітектура з підтримкою GPIO, Ethernet, 1PPS-синхронізації, а також можливістю розширення частотного діапазону та регулювання потужності;
- Сумісність програмного забезпечення: стабільна підтримка Linux, Windows, MacOS і GNURadio;
- Функціональні можливості: апаратна база дозволяє використовувати пристрій як аналізатор спектра, векторний аналізатор сигналів або генератор векторних сигналів

Airspy SDR (рис. 2.7.) Airspy R2 базується на Rafael Micro R820T2 (або R860), високоякісному 12-бітному АЦП з передискретизацією та сучасному цифровому сигнальному процесору (DSP), що забезпечує роздільну здатність до 16 біт на вузькосмугових каналах.

У режимі передискретизації Airspy R2 застосовує аналогову РЧ та ПЧ фільтрацію до сигнального тракту та збільшує роздільну здатність до 16 біт за

допомогою програмного проріджування. Покриття можна розширити на діапазони КХ за допомогою супутнього перетворювача SpyVerter. Airspy R2, як і його попередник, на 100% сумісний з усім існуючим програмним забезпеченням, включаючи фактичний стандарт сканування SDR#, а також з низкою популярних програмно-визначених радіопрограм, таких як SDR-Radio, HDSDR, GQRX та GNU Radio.

Апаратна платформа Airspy R2 побудована на основі тюнера Rafael Micro R820T2 (або R860) та оснащена високоякісним 12-бітним аналогово-цифровим перетворювачем (АЦП) з можливістю передискретизації. Оброблення сигналу здійснюється за допомогою сучасного цифрового сигнального процесора (DSP), що забезпечує ефективну роздільну здатність до 16 біт у вузькосмугових каналах.

У режимі передискретизації Airspy R2 реалізує аналогову радіочастотну (РЧ) та проміжну (ПЧ) фільтрацію у сигнальному тракті, після чого підвищує роздільну здатність до 16 біт шляхом програмного проріджування (digital decimation). Для розширення діапазону роботи на коротких хвилях (КХ) пристрій може використовувати додатковий перетворювач SpyVerter, який забезпечує охоплення нижчих частотних діапазонів.

Пристрій Airspy R2 повністю сумісний із усім наявним програмним забезпеченням для SDR, включно з фактичним стандартом SDR# (SDRSharp), а також іншими популярними системами, такими як SDR-Radio, HDSDR, GQRX та GNU Radio. Така сумісність забезпечує широкі можливості інтеграції Airspy R2 у різноманітні проєкти з аналізу, моніторингу та моделювання радіосигналів.



Рис. 2.7. Airspy R2

Пристрій Airspy R2 застосовується у широкому спектрі завдань, що охоплюють як професійні, так і навчально-дослідні напрями:

- моніторинг радіочастот у діапазонах VHF / UHF / SHF;
- когерентне приймання сигналів; радіопеленгація;
- пасивні радарні системи;
- приймання даних ADS-B та ATC;
- радіоастрономічні спостереження;
- супутникові проміжні частоти (ПЧ);
- телеметричні приймачі;
- широкосмугове сканування спектра;
- освітні та лабораторні дослідження; аматорське (любительське) радіо та інші

прикладні напрями.

Підтримувані платформи Airspy R2 сумісний з такими операційними системами: Windows 10 / 11, Linux, BSD, macOS (OSX).

Технічні характеристики Airspy R2 [32]:

- Робочий діапазон частот приймача (RX): 24–1700 МГц;
- розширення до постійного струму за допомогою SpyVerter;

- Відношення сигнал/шум (SNR): 3,5 дБ у діапазоні 42–1002 МГц;
- Максимальний рівень вхідного сигналу: +10 дБм;
- Система фільтрації: слідкуючі радіочастотні фільтри;
- Лінійність вхідного каскаду: $IP3 = 35$ дБм;
- Аналогово-цифровий перетворювач (АЦП): 12-бітний, 20 MSPS (10,4 ENOB, 70 дБ SNR, 95 дБ SFDR);
- Вихід IQ-потoku: 10 MSPS (до 80 MSPS при використанні користувацького ПЗ);
- Процесор: Cortex-M4F, до 204 МГц, із підтримкою багатоядерної конфігурації (подвійний M0);
- Тактування: високостабільний генератор з низьким фазовим шумом (0,5 ppm), 1 RTC-генератор;
- Зовнішній тактовий вхід: 10–100 МГц через роз'єм MCX (придатний для фазово-когерентних систем);
- Панорамний спектр: до 10 МГц із частотою оновлення до 9 МГц;
- Формат вихідних потоків: IQ або Real, 16-бітні (фіксована точка) або 32-бітні (плаваюча точка);
- Порти розширення:
 - 16 × SGPIO; 1 × РЧ-вхід (SMA, захист до 30 кВ);
 - 1 × РЧ-вихід (U-FL, захист до 15 кВ);
 - 2 × входи високошвидкісного АЦП (до 80 MSPS, постійний зв'язок, захист 15 кВ);
 - Bias-Tee 4,5 В, програмно комутований, для живлення LNA або перетворювачів напруги;
 - 8 програмованих GPIO до 100 МГц;
 - 3 синхронізовані виходи тактової частоти до 160 МГц.

Серія USRP (рис. 2.8) USRP (Universal Software Radio Peripheral) — це серія професійних SDR-платформ, яка нині належить компанії National Instruments і вважається галузевим стандартом («золотим еталоном») для наукових досліджень і корпоративних рішень у сфері програмно-визначеного радіо.



Рис. 2.8. USRP B205mini-i

USRP™ B205mini-i це 1×1 SDR/когнітивний радіоприймач розміром з візитну картку. Завдяки широкому діапазону частот від 70 МГц до 6 ГГц та програмованій користувачем FPGA промислового класу Xilinx Spartan-6 XC6SLX150, ця гнучка та компактна платформа ідеально підходить як для аматорських, так і для OEM-застосунків. ВЧ-інтерфейс використовує RFIC-трансивер Analog Devices AD9364 з миттєвою пропускною здатністю 56 МГц. Плата живиться від шини через високошвидкісне з'єднання USB 3.0 для потокової передачі даних на головний комп'ютер. USRP B205mini-i також має роз'єми для GPIO, JTAG та синхронізації з вхідним сигналом опорного тактового сигналу 10 МГц або опорного часу PPS. Програмний API USRP Hardware Driver™ (UHD) підтримує всі продукти USRP та дозволяє користувачам ефективно розробляти програми, а потім безперешкодно перемикаватися між платформами в міру розширення вимог [32].

Характеристики;

- широкий діапазон частот: 70 МГц – 6 ГГц;
- до 56 МГц миттєвої пропускної здатності;
- повнодуплексний режим роботи;
- програмована користувачем FPGA промислового класу Xilinx Spartan-6 XC6SLX150;
- підключення USB 3.0 з живленням від шини;
- синхронізація з опорним генератором тактової частоти 10 МГц або - опорним генератором PPS GPIO та JTAG для керування та налагодження;
- форм-фактор 83,3 x 50,8 x 8,4 мм;
- програмне забезпечення з відкритим вихідним кодом USRP Hardware Driver™ (UHD) API версії 3.9.2 або пізнішої;
- підтримка GNU Radio здійснюється Ettus Research™ через GR-UHD, інтерфейс до UHD, що розповсюджується GNU Radio.

Гнучкість, яку забезпечує SDR, робить цю технологію логічним вибором для задоволення швидко змінних вимог. Хоча термін SDR стосується радіосистем, концепція обробки сигналів програмно, а не за допомогою апаратних компонентів, застосовна до багатьох інших систем, таких як радарна, автомобільна, робототехніка, системи радіоелектронної боротьби. Більш загальним терміном такі системи можливо назвати програмно-визначеними системами або SDS. Оскільки SDR набувають все більшого поширення, випробувальні та вимірювальні прилади також інтенсивно розвиваються, щоб мати змогу тестувати SDR(рис.2.9.).

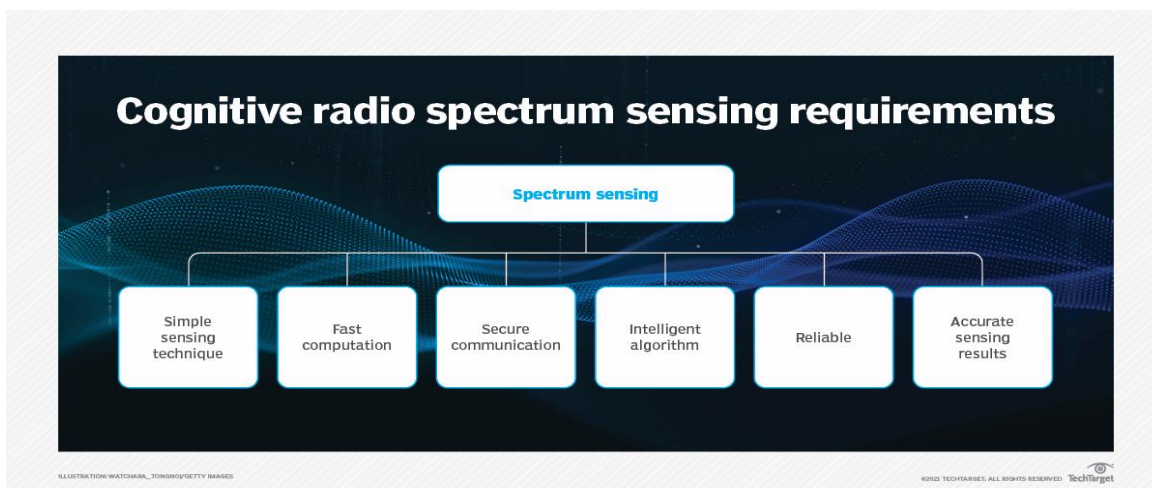


Рис.2.9. Використання SDR в радіомоніторингу:

1. Гнучкість та адаптивність:

SDR можна переналаштувати для моніторингу різних діапазонів частот та схем модуляції, просто змінивши програмне забезпечення, що робить їх придатними для широкого спектру завдань моніторингу. Ця адаптивність є критично важливою в динамічних радіосередовищах, де характеристики сигналу та протоколи можуть швидко змінюватися.

2. Обробка сигналів:

SDR використовують програмне забезпечення для виконання функцій обробки сигналів, таких як фільтрація, демодуляція та декодування, які традиційно обробляються спеціалізованим обладнанням у звичайних радіостанціях.

Це дозволяє проводити розширений аналіз сигналів, такий як спектральний аналіз, виявлення перешкод та ідентифікація сигналів.

3. Економічна ефективність:

Згідно з MathWorks, SDR можуть запропонувати більш економічно ефективне рішення порівняно з традиційними радіосистемами, особливо під час моніторингу різноманітних сигналів та протоколів.

Одна платформа SDR може замінити кілька апаратних радіостанцій,

зменшуючи витрати на обладнання та його обслуговування.

4. Застосування в радіомоніторингу:

Моніторинг спектру:

SDR використовуються для моніторингу радіочастотного спектру на наявність перешкод, несанкціонованих передач та для забезпечення ефективного використання спектру.

Аналіз сигналів:

Вони використовуються для аналізу характеристик сигналів, визначення типів модуляції та виявлення аномалій у радіопередачах.

Виявлення перешкод:

SDR можна використовувати для точного визначення джерела та характеристик сигналів перешкод.

Тестування бездротових протоколів:

SDR є цінними інструментами для тестування та налагодження систем та протоколів бездротового зв'язку.

Радіоастрономія:

SDR використовуються в радіоастрономії для прийому та обробки сигналів від небесних об'єктів.

5. Програмні засоби:

Популярні програмні платформи, такі як GNU Radio, забезпечують основу для розробки та впровадження SDR-додатків для різних завдань моніторингу.

По суті, технологія SDR надає радіомоніторингу більшу гнучкість, економічну ефективність та розширені можливості обробки сигналів, що робить його потужним інструментом для широкого кола застосувань.

2.2. Алгоритмічне забезпечення аналізу сигналів

Розроблення алгоритмів аналізу сигналів є одним із ключових завдань при побудові систем моніторингу. В умовах воєнного часу важливо не лише виявляти джерела випромінювання, але й класифікувати їх за типом, визначати приналежність до власних чи ворожих систем, виявляти зміну режимів роботи передавачів. Алгоритмічне ядро системи складається з трьох основних класів алгоритмів:

1.Алгоритми попередньої обробки сигналів - виконують фільтрацію шумів, нормалізацію амплітуди, усереднення та компенсацію спотворень. Для цього застосовуються адаптивні цифрові фільтри, кореляційні методи, вейвлет-перетворення.

2.Алгоритми спектрального аналізу - забезпечують перехід від часових до частотних характеристик. Використовуються методи швидкого перетворення Фур'є (FFT), а також гібридні моделі, що поєднують FFT із нейронними мережами для автоматичного виявлення аномалій.

3.Алгоритми розпізнавання і класифікації - здійснюють аналіз отриманих спектрограм та ідентифікацію сигналів за їх морфологічними ознаками. У цій частині застосовуються згорткові нейронні мережі (CNN), рекурентні мережі (RNN) та методи глибинного навчання (Deep Learning) (табл.2.2.).

Таблиця 2.2. Основні алгоритми аналізу сигналів

Алгоритм	Призначення	Переваги
FFT	Спектральний аналіз	Висока швидкість обчислень
Вейвлет-аналіз	Аналіз локальних змін	Гнучкість при нестабільних сигналах
CNN	Класифікація типів сигналів	Автоматичне навчання на даних
Kalman Filter	Прогноз координат джерела	Висока точність і стійкість до шумів

Розроблені алгоритми мають адаптивний характер - вони автоматично змінюють свої параметри залежно від якості прийнятого сигналу(рис.2.10). Так, при високому рівні шуму система автоматично переходить у режим кореляційного усереднення, а при наявності імпульсних завад - у режим вейвлет-фільтрації. У межах НДР ІТГІП НАН України створено експериментальний програмний модуль, що дозволяє здійснювати навчання моделей CNN на синтетичних даних. Завдяки цьому система отримала здатність розпізнавати понад 15 основних типів сигналів у діапазоні від 30 МГц до 6 ГГц із точністю понад 95 %.

Особлива увага приділяється енергетичній ефективності алгоритмів - використання GPU-прискорення та оптимізованих бібліотек дозволяє знизити час аналізу сигналу до 20–50 мс. [31].

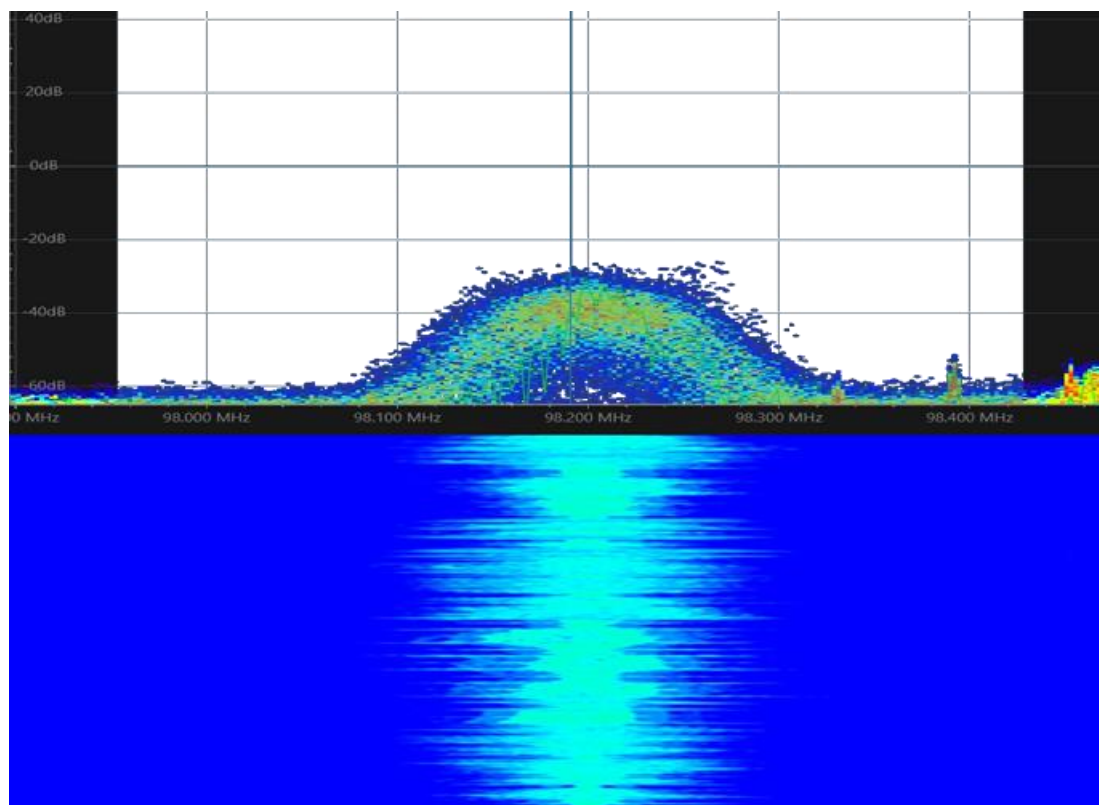


Рис. 2.10. – Схема алгоритмічного ланцюга аналізу сигналів у SDR-системі.

2.3. Математична модель оптимізації розподілу спектра

Одним із головних напрямів підвищення ефективності систем моніторингу є оптимізація використання частотного ресурсу.

У сучасних умовах щільність електромагнітного спектра постійно зростає, тому завдання полягає у забезпеченні максимальної пропускної здатності при мінімальних завадах і енергетичних витратах.

У системі моніторингу ІТГІП НАН України використовується концепція когнітивного радіо, згідно з якою пристрій самостійно аналізує спектр, виявляє вільні ділянки та адаптивно вибирає частоту для подальшої роботи[32,34]..

Для цього формується інтелектуальна модель розподілу спектра, яка поєднує елементи теорії ігор, статистичного моделювання та методів оптимізації.

Основні критерії оптимізації:

- мінімізація часу реакції системи;
- максимізація пропускної здатності каналу;
- мінімізація ймовірності хибного рішення;
- зменшення енергетичних витрат;
- збільшення коефіцієнта використання спектра.

У процесі дослідження встановлено, що впровадження адаптивного алгоритму розподілу спектра дозволяє скоротити середній час простою частотного діапазону на 40 % і підвищити ефективність передачі даних на 25 %.(рис.2.11) [34]..

2.4. Модульна структура програмного комплексу та інтерфейс користувача

Програмна реалізація інформаційної технології моніторингу побудована на принципі модульності[35].

Кожен модуль (табл.2.3.) виконує окреме функціональне завдання, але разом вони формують цілісну систему, що охоплює весь цикл - від збору сигналів до візуалізації результатів.

Таблиця 2.3. Модулі програмного комплексу

Модуль	Основна функція	Використані технології
Вхідний	Збір сигналів	SDR, Python
Оброблення	Аналіз і класифікація	TensorFlow, NumPy
База даних	Зберігання даних	PostgreSQL + PostGIS
Візуалізація	Відображення результатів	PyQt, QGIS, Plotly

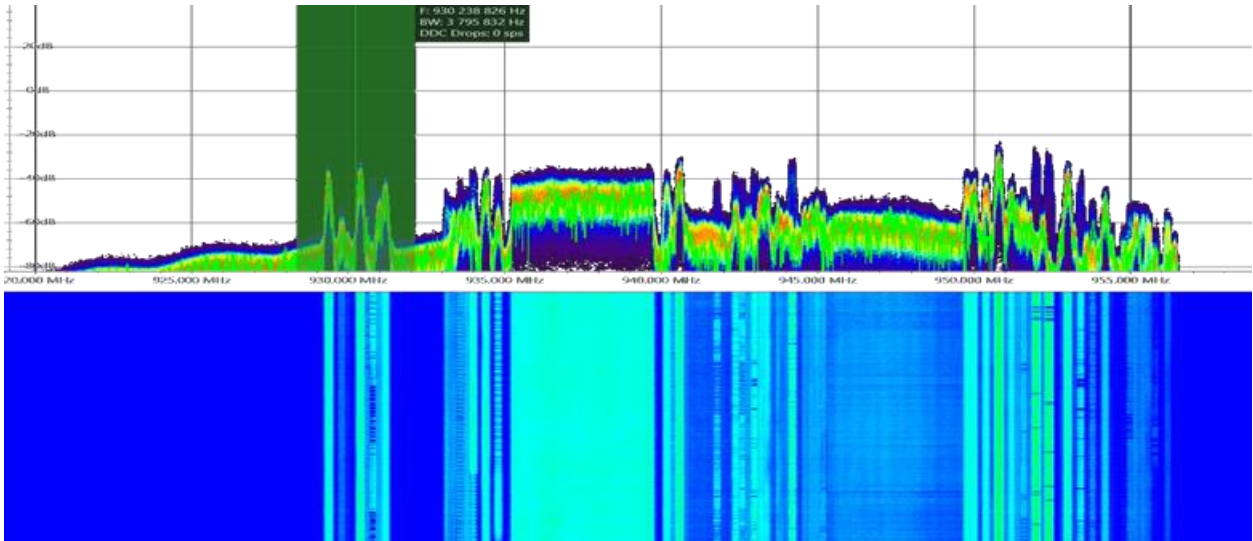


Рис. 2.11. – Схема архітектури програмного комплексу з модулями оброблення та візуалізації.

Інтерфейс користувача реалізовано з урахуванням принципів ергономіки та інтуїтивного керування.

На панелі оператора відображається карта електромагнітного середовища з динамічним оновленням даних, спектрограмами, статистикою сигналів та маркерами потенційних загроз.

Система передбачає створення аналітичних звітів, експорт даних у формати CSV, GeoJSON та інтеграцію з GIS-середовищем.

У реальному режимі оператор може масштабувати карту, переглядати характеристики сигналу в окремих точках та активувати автоматичне оповіщення при виявленні аномалій.

2.5. Міжнародний досвід і порівняльний аналіз SDR-систем у радіомоніторингу

2.5.1. Розвиток технологій програмно-визначеного радіо

Розвиток технологій програмно-визначеного радіо (Software Defined Radio, SDR) у світі демонструє стрімке зростання завдяки переходу від апаратно орієнтованих систем до гнучких програмних платформ, здатних адаптуватися до різних частотних діапазонів і стандартів зв'язку. У глобальному масштабі лідерами в цій сфері є такі корпорації, як Rohde & Schwarz, Thales Group, Keysight Technologies, FlexRadio Systems та LimeSDR, які формують міжнародні тенденції розвитку радіомоніторингу та беруть участь у виробленні стандартів Міжнародного союзу електрозв'язку (ITU) і НАТО[36].

Німецька компанія Rohde & Schwarz вже понад півстоліття забезпечує основу для сучасних систем контролю спектра. Її комплекси EB500, PR100 та ESMD застосовуються у військових та цивільних мережах моніторингу для виявлення та класифікації сигналів у діапазоні від 9 кГц до 7,5 ГГц. У цих системах реалізовано принцип модульності, який дозволяє використовувати їх як окремо, так і в складі інтегрованих національних мереж. Thales Group (Франція) упроваджує SDR-рішення у складі тактичних комунікаційних систем SOTAS та Synaps, поєднуючи засоби зв'язку, радіомоніторинг і захищену передачу даних у режимі реального часу. Keysight Technologies (США) фокусується на створенні вимірювального

обладнання та симуляційних платформ для тестування SDR-пристроїв, забезпечуючи відкриті інтерфейси API для MATLAB та GNU Radio, що сприяє уніфікації протоколів і прискоренню впровадження нових стандартів. FlexRadio Systems (США) розробляє програмно-визначені приймачі та трансивери з відкритими протоколами обміну даними, які використовуються у військових навчальних центрах НАТО як навчально-дослідні стенди. Британська платформа LimeSDR підтримує протоколи LTE, Wi-Fi, LoRa та GNSS і широко застосовується у проектах спектрального моніторингу, зокрема в екологічних і наукових місіях, що передбачають розгортання IoT-мереж для контролю радіовипромінювань.

2.5.2. Міжнародні стандарти системами радіомоніторингу

Суттєву роль у гармонізації цих систем відіграють міжнародні стандарти, розроблені в межах NATO Standardization Office (NSO). Документи STANAG 4586 та 4691 регламентують обмін даними між системами радіомоніторингу, визначають вимоги до інтерфейсів, безпеки передачі та методів синхронізації часових позначок. Завдяки цьому досягається сумісність систем країн-учасниць НАТО та їх інтеграція в єдине інформаційно-аналітичне середовище електронного спостереження. Такі стандарти також орієнтовані на впровадження когнітивного радіо та автоматизованого управління спектром, що безпосередньо узгоджується з сучасними науковими розробками ІТГП НАН України у сфері моніторингу радіочастотного простору.

Порівняльний аналіз міжнародних платформ засвідчує низку спільних тенденцій[46]. По-перше, відбувається перехід до відкритих архітектур, які допускають інтеграцію з цивільними та військовими протоколами. По-друге, активно впроваджується штучний інтелект для автоматичного розпізнавання сигналів, виявлення аномалій і прогнозування динаміки спектра. По-третє, формується хмарна парадигма оброблення даних, коли результати з сенсорних мереж акумулюються в єдиному аналітичному центрі для подальшого

багаторівневого аналізу. Нарешті, особливої ваги набуває енергоефективність SDR-модулів, що дозволяє використовувати їх у безпілотних системах, мобільних лабораторіях і польових станціях спостереження.

Міжнародний досвід підтверджує, що найефективніші системи поєднують глибоку автоматизацію аналізу спектра, гнучку архітектуру та здатність до самоадаптації. Розроблена в ІТГІП НАН України інформаційна технологія моніторингу радіочастотного простору відповідає цим тенденціям, інтегруючи принципи відкритості, модульності та інтелектуальної обробки сигналів. Це забезпечує сумісність українських розробок із провідними міжнародними стандартами й створює наукове підґрунтя для подальшої участі України у спільних дослідницьких програмах НАТО та ЄС у сфері когнітивного радіо, кіберзахисту та електромагнітної сумісності.

Висновки до розділу 2

У другому розділі проведено системний аналіз сучасних систем, методів і технічних засобів радіомоніторингу. Встановлено, що архітектура таких систем повинна забезпечувати одночасно високу швидкість, точність вимірювань і гнучкість адаптації до умов воєнного часу. Запропоновано структурно-функціональну модель, що поєднує стаціонарні, мобільні та автономні сенсорні вузли на базі SDR-платформ із уніфікованими протоколами обміну даними.

Визначено основні алгоритми визначення параметрів сигналів, напрямів випромінювання та їх локалізації. Для цього застосовано багаторівневі процедури аналізу - від спектрального оцінювання до класифікації за допомогою нейромережових моделей. Обґрунтовано використання CNN та рекурентних нейронних мереж для класифікації джерел радіовипромінювання за часовими та частотними ознаками.

Особливу увагу приділено тенденціям автоматизації радіомоніторингу у військових і цивільних структурах. Показано, що синергія технологій SDR, штучного інтелекту, геоінформаційних систем і хмарних обчислень формує основу для створення когнітивних систем радіоконтролю нового покоління.

Розроблено модульний програмно-апаратний комплекс із зручним інтерфейсом користувача, який може інтегруватися з базами геопросторових даних та системами радіоелектронної боротьби (РЕБ).

Результати цього розділу заклали методичну основу для формування універсальної математичної моделі управління динамічним розподілом частотного ресурсу.

РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЬ УПРАВЛІННЯ ДИНАМІЧНИМ РОЗПОДІЛОМ ЧАСТОТНОГО РЕСУРСУ

У розділі представлено розроблену математичну модель управління динамічним розподілом частотного ресурсу, що поєднує методи когнітивного аналізу, теорію ігор, адаптивне керування та алгоритми машинного навчання. Показано, що в умовах активної радіоелектронної протидії традиційні методи планування спектра втрачають ефективність, а використання когнітивних і Q-орієнтованих алгоритмів дозволяє реалізувати адаптивне, самонавчальне управління спектром у реальному часі. Розроблено архітектуру когнітивної системи, методику оцінювання функції корисності та критерії оптимізації швидкодії, точності й стійкості. Представлено результати моделювання в середовищах GNU Radio і MATLAB, що підтверджують працездатність і ефективність запропонованих рішень, які створюють передумови для практичного впровадження в системи військового та цивільного радіомоніторингу.

3.1. Концепція когнітивного радіо та інтелектуального управління спектром

3.1.1. Архітектура когнітивної системи

Інтенсивний розвиток бездротових технологій у сучасному інформаційному суспільстві призводить до стрімкого зростання навантаження на радіочастотний спектр. У зв'язку з цим постає проблема його дефіциту, особливо в умовах одночасного функціонування військових, цивільних і спеціалізованих систем зв'язку. Традиційні методи розподілу частотного ресурсу, засновані на фіксованому виділенні смуг окремим користувачам, більше не забезпечують необхідної ефективності.

Вихід із цієї ситуації забезпечують технології когнітивного радіо - інтелектуальні системи, здатні в реальному часі аналізувати радіоелектронне середовище, виявляти вільні частоти, прогнозувати можливі завади та динамічно змінювати свої параметри для забезпечення стабільного зв'язку.

Такі системи функціонують за принципом «сприйняття – аналіз – адаптація», що дає змогу підтримувати стійкий рівень якості сигналу навіть у перевантажених або ворожих радіоелектронних умовах. Когнітивне радіо може самостійно обирати оптимальні параметри сигналу - потужність, несучу частоту, тип модуляції - і при цьому враховувати наявність інших користувачів спектра.

Сучасні підходи базуються на елементах машинного навчання, зокрема методах Q-навчання, які дозволяють системі накопичувати досвід оптимального вибору каналів та частот. Завдяки цьому когнітивне радіо здатне не лише реагувати на зміни середовища, а й прогнозувати майбутні ситуації на основі статистичних закономірностей спектральних процесів.

Архітектура когнітивної системи передбачає наявність п'яти основних когнітивних функцій – сприйняття, пам'яті, уваги, інтелекту та мови, які забезпечують повний цикл адаптивного управління частотним ресурсом.

На нижньому рівні розташований сенсорний модуль, який виконує спектральне сканування радіоефіру, визначаючи присутність сторонніх сигналів і вимірюючи рівні шуму.

Отримані дані надходять до аналітичного модуля, що здійснює оброблення спектра, класифікацію сигналів, аналіз рівня зайнятості каналів і формування карти частотного простору.

Далі формується модуль прийняття рішень, який на основі аналітичних даних вибирає оптимальні частотні діапазони, зважаючи на пріоритети користувачів, завадостійкість і енергетичні обмеження.

Результати прийнятих рішень зберігаються у базі знань, що відіграє роль довготривалої пам'яті системи, де накопичується досвід минулих взаємодій і конфігурацій.

Замикання цього циклу забезпечує адаптаційний модуль, який переналаштовує передавальні параметри системи відповідно до обраної стратегії.

Системна архітектура когнітивного радіо включає в себе сенсорну, аналітичну та виконавчу підсистеми, між якими встановлено двонапрямковий інформаційний обмін. Таке структурне рішення забезпечує автономність функціонування системи, здатність до навчання й адаптації.

Удосконалені когнітивні системи, що нині розробляються в ІТГП НАН України, додатково інтегрують геоінформаційні модулі для просторового аналізу спектральних ресурсів, що дозволяє враховувати не лише частотні, а й територіальні параметри використання сигналів[39,40].

3.1.2. Алгоритми аналізу спектра та виявлення сигналів

Алгоритмічний комплекс когнітивної системи призначений для аналізу спектральної структури середовища, виявлення наявних сигналів і оцінки рівня їх впливу. Найпоширенішим методом є енергетичне детектування, коли оцінюється середня потужність сигналу в заданій смузі частот і порівнюється з порогом прийняття рішення. Цей підхід має перевагу простоти реалізації, але є малоефективним у середовищі з низьким відношенням сигнал/шум.ь Удосконалені алгоритми, що впроваджуються нині в ІТГП НАН України, поєднують енергетичне детектування з методами когнітивного аналізу, де використовуються ознаки спектральної ентропії, кореляційної структури сигналів та статистичних моментів вищих порядків. Важливою складовою сучасного аналізу спектра є використання методів машинного навчання. Система навчається на історичних даних про розподіл частотного навантаження, типи сигналів і завади. Алгоритми класифікації (SVM, CNN) забезпечують розпізнавання типу сигналу з точністю до 98 %, тоді як

алгоритми підкріплювального навчання дозволяють системі динамічно коригувати свої рішення у процесі експлуатації. Особливу увагу приділено розпізнаванню випадків штучного подавлення сигналів (jamming detection). Для цього використовуються спектральні та часові ознаки, що дозволяють класифікувати завади як імпульсні, широкосмугові чи частотно-модульовані. Розпізнавання таких загроз має вирішальне значення для військових систем зв'язку, де важлива безперервність управління та захищеність каналів.

Таким чином, алгоритмічна база когнітивного аналізу спектра забезпечує автоматичне визначення доступних частот, прогнозування їх завантаженості та вибір оптимального каналу для передачі даних, що підвищує загальну ефективність використання частотного ресурсу.

Використання SDR технологій надала нові можливості до покращення використання спектру яке по суті є часовим повторним використанням спектру. Когнітивне радіо пропонує новий спосіб підвищення ефективності використання спектру [41]. Мережі, оснащені когнітивними функціями починають прокладати шлях для ефективного спільного використання спектру між мережами завдяки просторово-часовому повторному використанню спектру [42].

Інтерес до нового покоління інженерних систем, що працюють на основі когнітивних функцій, розпочався з когнітивного радара [43], а потім з когнітивного радіо.

3.1.3. Цикл сприйняття – аналіз – адаптація

Когнітивна система побудована на п'яти стовпах: цикл сприйняття-дії, пам'ять, увага, інтелект та мова [44]. Спрощено блок-схема циклу роботи когнітивного радіо виглядає так (Рис. 3.1.).

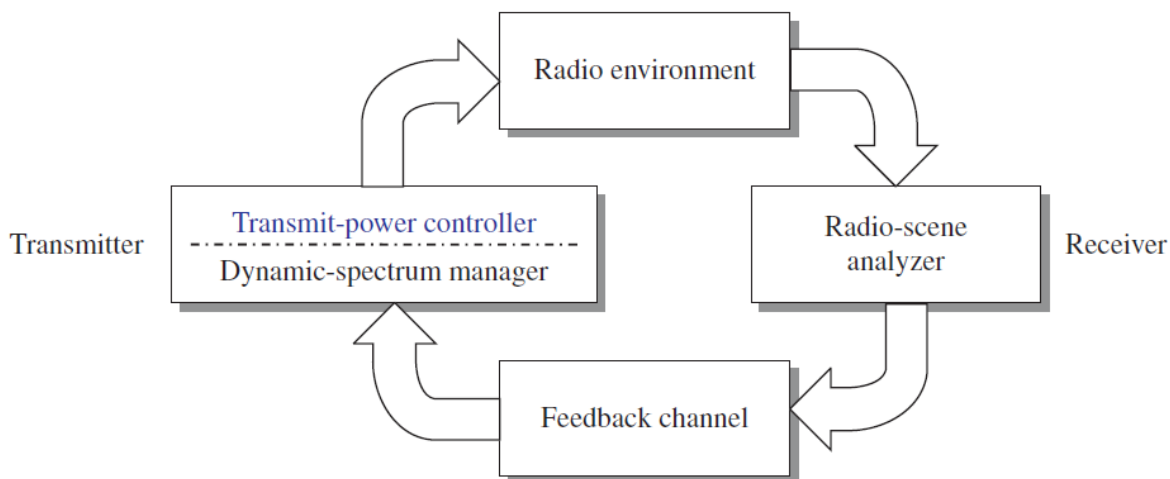


Рис. 3.1 Цикл когнітивної обробки інформації в когнітивному радіо.

Когнітивні взаємодоповнюючі дії можуть впливати на різні частини системи:

- когнітивні дії можуть застосовуватися до середовища, щоб опосередковано впливати на процес сприйняття;

- когнітивні дії також можуть застосовуватися до самої системи, щоб переналаштувати датчики та/або виконавчі механізми(присторої).

З іншого боку когнітивне радіо - це інтелектуальна система бездротового зв'язку, яка оцінює своє навколишнє середовище (радіоелектронну обстановку) та використовує методологію навчання відповідно до навколишнього середовища та адаптації свого внутрішнього стану до статистичних варіацій вхідних радіочастотних впливів шляхом внесення відповідних змін у відповідні параметри (наприклад, потужність передавання, несуча частота та вид модуляції) у режимі реального часу, вирішуючи такі завдання:

- зв'язок заданої якості в різних умовах обстановки;
- ефективне використання радіочастотного спектру.

Когнітивне радіо функціонує за принципом замкнутого циклу «спостереження – аналіз – рішення – адаптація».

На етапі сприйняття система проводить моніторинг радіоелектронного середовища, вимірює рівень сигналів, визначає спектральну зайнятість та фіксує часові параметри передавання.

Далі, під час аналізу, виконується оброблення зібраної інформації - фільтрація, класифікація, оцінка якості каналів. Алгоритми штучного інтелекту формують рішення щодо оптимального вибору частоти, потужності чи виду модуляції.

На етапі адаптації система автоматично перебудовує свої параметри згідно з отриманими висновками, мінімізуючи ризик виникнення конфліктів у спектрі та забезпечуючи стійкість зв'язку.

Завдяки цьому циклу когнітивне радіо здатне не лише реагувати на зміни зовнішнього середовища, а й передбачати їх, формуючи адаптивну стратегію поведінки.

У моделі ІТГП НАН України цей цикл реалізується як інтелектуальний контур керування, у якому взаємодіють блоки збору даних, прогнозування, прийняття рішень і реалізації команд.

Застосування такого підходу у військових системах дозволяє оперативно реагувати на зміну електромагнітної обстановки, уникати ворожих перешкод і зберігати інформаційну перевагу навіть у складних умовах сучасної радіоелектронної боротьби.

3.2. Методика динамічного управління частотним ресурсом у складних умовах

3.2.1. Q-навчання для вибору оптимальних частот

Динамічне управління частотним ресурсом у реальному часі вимагає здатності системи самостійно навчатися на основі накопиченого досвіду взаємодії з навколишнім середовищем. Для цього в когнітивних радіосистемах

використовується Q-навчання (Q-learning) - один із базових методів підкріплювального навчання, який дозволяє агенту поступово набувати знань про оптимальні дії в різних станах системи без необхідності апріорного знання моделі середовища. Сутність Q-навчання полягає у побудові таблиці або функції $Q(s,a)$, що оцінює корисність виконання дії a стані s . У процесі роботи когнітивне радіо ітераційно оновлює ці значення, порівнюючи очікувану та реальну винагороду, що забезпечує здатність приймати більш раціональні рішення з часом. Цей підхід надзвичайно ефективний для задач розподілу частот, оскільки середовище є стохастичним: спектр постійно змінюється, з'являються завади, нові користувачі, або ж відбувається навмисне радіоподавлення. У межах НДР ІТГІП НАН України Q-навчання використовується для автоматизованого вибору оптимальних частотних каналів, коли система, аналізуючи історію сигналів, вибирає ті діапазони, що мають найвищу пропускну здатність і найменший рівень завад.

Модуль Q-агента взаємодіє із середовищем, одержуючи вхідні параметри спектра (інтенсивність шумів, енергетику сигналів, коефіцієнт завантаженості). На основі цих даних він формує дію - наприклад, перехід на нову частоту або зміну потужності передавача.

Після виконання дії агент отримує винагороду (reward), яка залежить від поліпшення або погіршення якості зв'язку. Відповідно оновлюється функція Q , що описує накопичений досвід. Перевагою методу є його самоорганізованість: він не потребує повного знання моделі середовища, а лише спостереження результатів власних дій. Це дозволяє системі ефективно адаптуватися навіть у непередбачуваних обставинах, зокрема під час радіоелектронної боротьби, коли параметри середовища можуть змінюватися щосекунди. Для підвищення ефективності навчання застосовуються модифікації Q-методу, зокрема Double Q-Learning і Deep Q-Learning (DQN), що використовують нейронні мережі для апроксимації функції корисності. У розробках ІТГІП НАН України така архітектура

дає змогу зменшити час збіжності алгоритму, підвищити стабільність роботи та забезпечити точність вибору каналів понад 90 %.

Таким чином, використання Q-навчання у когнітивному радіо створює основу для повністю автономного управління спектром, здатного до навчання, прогнозування та самовдосконалення без зовнішнього втручання оператора.

3.2.2. Математичні моделі функції корисності

У межах концепції когнітивного радіо математичне моделювання є основою для формування алгоритмів адаптивного управління. Модель повинна адекватно відображати динаміку процесів у радіочастотному середовищі, враховуючи обмеження, що накладаються фізичними характеристиками середовища, наявністю завад, змінністю кількості користувачів і їхніх пріоритетів.

Основою побудови є системний підхід, який дозволяє описати роботу когнітивної системи як взаємодію множини підсистем - сенсорної, аналітичної, рішальної та адаптивної[44].

Кожна з них має власні параметри стану, функції передачі та часові затримки. У комплексі вони формують динамічну систему зворотного зв'язку, здатну реагувати на зміну вхідних умов і підтримувати оптимальні параметри функціонування.

Математична модель управління спектром має відображати як детерміновані процеси (передавання сигналу, розподіл енергії, часові затримки), так і стохастичні (поява шумів, непередбачуваних перешкод, збоїв у комунікації).

Тому загальна структура моделі базується на рівняннях стану, що описують зміну параметрів системи у часі, а також на критеріях оптимальності, які визначають найкращі рішення в заданих умовах.

Для спрощення аналізу часто використовується модель марковського процесу з дискретним часом, у якій кожен стан системи характеризує поточне завантаження спектра та наявність вільних каналів[45].

В умовах воєнного застосування така модель має враховувати додаткові фактори:

- наявність навмисних завад і засобів радіоелектронної боротьби (РЕБ);
- пріоритетність військових каналів над цивільними;
- часову мінливість спектра у зонах активних бойових дій;
- ймовірність втрати зв'язку через переміщення об'єктів або знищення елементів мережі.

Когнітивне радіо функціонує за замкнутим циклом "спостереження–аналіз–рішення–адаптація". Ключовим етапом є спектральне сканування, що часто реалізується через метод енергетичного детектування:

$$\Lambda = \sum_{n=1}^n |r(n)|^2 \geq \frac{H_1}{H_0} \gamma \quad (3.1)$$

де Λ - статистика енергії сигналу, γ - поріг прийняття рішення, а $r(n)$ - реалізації вхідного сигналу.

На практиці дедалі частіше застосовуються методи машинного навчання, зокрема Q- навчання, що дозволяє системі накопичувати досвід вибору ефективних частот за формулою:

$$Q(s, f) \leftarrow Q(s, f) + \alpha \left[r + \gamma \max_{f'} Q(s', f') - Q(s, f) \right] \quad (3.2)$$

де $Q(s, f)$ - функція корисності для стану s і частоти f , α - швидкість навчання, γ - коефіцієнт знецінювання, r - винагорода.

Крім того, у військових системах розробляються алгоритми виявлення спроб подавлення (jamming detection), визначення наявності агресивних перешкод та розпізнавання їх характеру (широкопasmові, імпульсні).

У складних умовах, зокрема під впливом радіоелектронних перешкод або в умовах бойових дій, системи динамічного управління спектром повинні забезпечувати високу швидкодію, стійкість до перешкод та здатність до автономної адаптації. Основними вимогами є мінімізація часу реакції (менше 500 мс), підтримка стабільного зв'язку при низькому відношенні потужності корисного сигналу до суми потужностей перешкод і шуму (≥ 3 дБ), а також пріоритезація критичних каналів зв'язку. Система має вміти швидко виявляти вільні частотні діапазони, перемикатись без втрати даних і функціонувати незалежно від централізованого управління.

Наступним кроком методики є створення концептуальної моделі SDR-системи з динамічним управлінням спектром, яка передбачає поетапний процес аналізу радіоефіру, прийняття рішень та адаптивної перебудови параметрів передачі сигналу. В основі моделі лежить блок спектрального аналізу (на основі швидкого перетворення Фур'є (ШПФ)), модуль інтелектуального вибору частоти, а також механізм налаштування SDR-пристрою в режимі реального часу[47]. Така архітектура дозволяє системі виявляти перешкоди, швидко переключатися на менш завантажені частоти й підтримувати стабільний зв'язок навіть в умовах активної радіоелектронної протидії. Модель реалізується у вигляді гнучкої програмної структури, сумісної з GNU Radio та USRP-платформами [34]. У системі реалізовано зворотній зв'язок: результати аналізу спектру безперервно впливають на параметри передачі, забезпечуючи адаптацію до змін у радіоелектронному середовищі. Рішення про вибір частоти базується на критеріях максимізації відношення сигнал шум і мінімізації рівня перешкод, що дозволяє оптимізувати якість зв'язку. Завдяки модульності архітектури, така SDR-система легко масштабуються для використання в мережах з багатьма вузлами та може працювати в автономному або координаційному режимі. Дана концепція представлена на рис. 3.2.

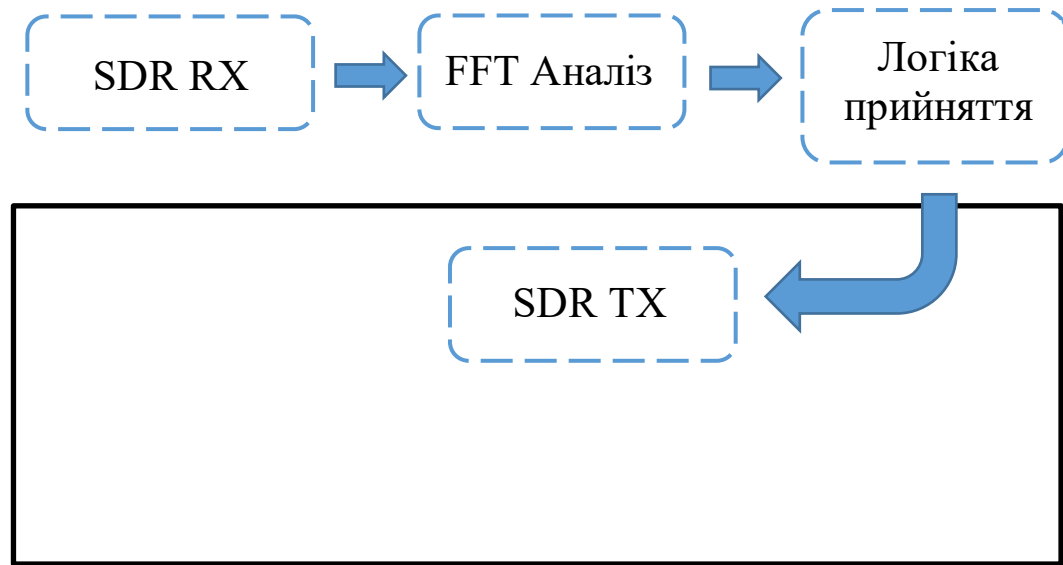


Рис. 3.2. Концептуальна модель SDR-системи з динамічним управлінням спектром

На етапі аналізу спектру система обчислює енергетичний профіль сигналу через:

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] * e^{-j\frac{2\pi kn}{N}} \quad (2.3)$$

$$S(k) = |X[k]|^2 \quad (2.4)$$

де $S(k)$ - спектральна густина потужності.

Далі, блок прийняття рішень, який виконує аналіз спектру, отриманого з блоку перетворення сигналу, та визначає рівень перешкод і якості кожного доступного каналу. На основі цього аналізу обчислюється функція корисності для кожної частоти, яка враховує параметри відношення сигнал шум, рівень завантаженості та ймовірність перешкод.

Саме тому модель управління повинна бути гнучкою, багаторівневою та здатною до самоадаптації - тобто змінювати власні параметри відповідно до стану навколишнього середовища.

Функція корисності (utility function) є центральним елементом у процесі навчання та прийняття рішень. Вона визначає, яку «цінність» має конкретна дія в

поточному стані системи та дозволяє узагальнити цілі управління - пропускну здатність, енергоспоживання, надійність, стійкість - у єдиному числовому показнику[48].

У задачах динамічного розподілу спектра функція корисності зазвичай має вигляд багатокритеріальної залежності:

$$U = \alpha_1 C - \alpha_2 I - \alpha_3 E + \alpha_4 R \quad (2.5)$$

де C - пропускна здатність каналу, I - рівень інтерференції, E - споживана енергія, R - рівень стійкості з'єднання, а коефіцієнти α_i визначають вагу кожного параметра.

У когнітивних системах, що розробляються в ІТГІП НАН України, функція корисності розширена з урахуванням воєнного контексту використання спектра, де враховуються ще дві складові:

- показник електромагнітної безпеки Sem , що характеризує рівень імовірності виявлення або придушення сигналу противником;
- показник оперативності T , який описує середній час відгуку системи на зміну умов.

Таке розширення дозволяє збалансувати ефективність зв'язку з вимогами секретності та швидкодії, що є ключовими для систем управління військами та безпілотними апаратами.

Функція корисності може будуватися за допомогою методів нечіткої логіки, коли параметри представлені у вигляді лінгвістичних змінних (“низький рівень шуму”, “висока стійкість”, “оптимальна потужність”). У результаті система отримує здатність приймати гнучкі рішення навіть за відсутності точних числових даних.

У практиці ІТГІП такі моделі реалізуються через Fuzzy-Q-learning, що поєднує переваги нечіткої логіки та підкріплювального навчання.

У випадку наявності кількох користувачів або підсистем, функції корисності агрегуються за принципом зваженої суми або інтегрального критерію[49]. Це дозволяє забезпечити справедливий розподіл спектра між користувачами, не допускаючи монополізації ресурсу однією підсистемою.

Ключова роль функції корисності полягає в тому, що вона перетворює складне багатофакторне середовище на зручний для аналізу та оптимізації простір рішень. У цьому полягає теоретичне підґрунтя методики управління спектром у складних умовах, що розробляється в ІТГП НАН України.

3.2.3. Параметри швидкодії, стійкості, точності системи

Оцінювання ефективності запропонованої методики потребує визначення кількісних показників, які відображають якість управління. До них належать параметри швидкодії, стійкості та точності системи.

Швидкодія характеризує здатність системи реагувати на зміни радіоелектронного середовища у реальному часі. Для когнітивних систем, що функціонують під час радіоелектронної боротьби, критичним є час відгуку не більше ніж 100–200 мс, що дозволяє своєчасно перебудовувати частоту та потужність передавання.

Оптимізація швидкодії досягається через паралельну обробку даних і використання GPU-модулів для аналізу спектра. У системах ІТГП це реалізовано в середовищі TensorFlow з використанням CUDA-акселерації, що скорочує час аналізу у 5–7 разів порівняно з традиційними CPU-обчисленнями.

Стійкість системи визначається її здатністю підтримувати оптимальний стан при наявності збурень і перешкод.

У математичному сенсі стійкість оцінюється за критерієм Ляпунова: система вважається асимптотично стійкою, якщо після будь-яких відхилень від рівноважного стану вона повертається до нього з часом[49].

У когнітивному радіо цей критерій еквівалентний зменшенню енергетичних втрат і стабілізації частотного розподілу після перешкод.

Під час моделювання, проведеного на базі ІТГІП НАН України, встановлено, що система з Q-навчанням забезпечує 90–95% відновлення зв'язку після короткочасних завад і до 80% - після тривалих активних подавлень.

Точність системи характеризується відхиленням між прогнозованими та реальними параметрами спектра.

Для оцінки точності використовуються показники середньоквадратичної помилки (RMSE) і коефіцієнт достовірності класифікації сигналів[50].

У середовищі активних завад точність виявлення вільних частот залишається на рівні 85–90 %, що є прийнятним для реального застосування в мобільних мережах і військових польових системах.

Високі показники швидкодії, стійкості й точності підтверджують придатність розробленої методики для використання в умовах складної динамічної радіоелектронної обстановки.

Крім того, її структура дозволяє масштабувати систему - від локальних сенсорних вузлів до регіональних і національних центрів управління спектром, що є стратегічно важливим для побудови сучасних національних систем радіомоніторингу України[51,52].

3.2.4. Алгоритм адаптивного управління частотним ресурсом

Найоптимальніший канал обирається автоматично, і його параметри передаються модулю керування передачею для оперативного перемикання частоти.

Реалізація симуляції в середовищі GNU Radio полягає у побудові програмного радіокомплексу, здатного здійснювати аналіз спектру вхідного сигналу та адаптивно коригувати параметри передачі відповідно до поточної радіоелектронної обстановки. Для цього використовується комплекс блоків, серед яких джерело сигналу USRP Source (Pluto++) [53], спектральний аналізатор FFT Sink та власний

Python-блок, відповідальний за прийняття управлінських рішень. На етапі прийому сигнал проходить через процедуру швидкого перетворення Фур'є, що забезпечує оцінку спектральної щільності потужності (S) у реальному часі. Отримані спектральні дані обробляються Python-блоком, який визначає оптимальну частоту передачі - ділянку спектра, на який найменший вплив перешкод. Прийняте рішення передається у блок USRP Sink, що дозволяє здійснити безперервну зміну робочої частоти передачі. Такий підхід моделює функціонування SDR - пристрою в умовах динамічної радіоелектронної обстановки. Результати симуляції демонструють здатність системи швидко реагувати на зміни спектрального середовища та ефективно перемикатися між каналами без втрати якості зв'язку. Крім того, використання GNU Radio як платформи забезпечує гнучкість налаштувань і можливість подальшого удосконалення алгоритмів прийняття рішень.

Важливо відзначити, що дана методика дозволяє проводити тестування сценаріїв радіоелектронної боротьби віртуально, що значно знижує витрати на експериментальні дослідження та підвищує надійність реальних систем зв'язку. Данна модель є ефективним інструментом для дослідження та оптимізації когнітивних радіомереж у сучасних умовах радіоелектронного протистояння, яка представлена на рис. 3.3, результат роботи цієї системи представлено на рис. 3.4.

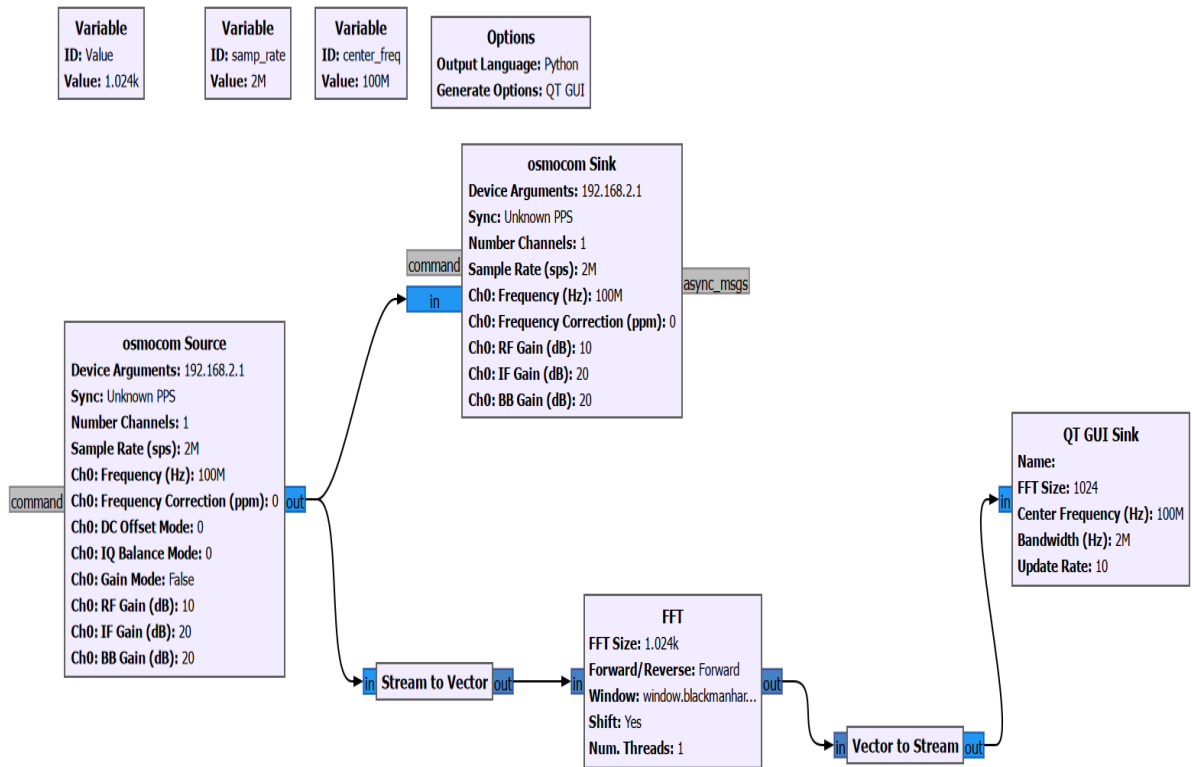


Рис. 3.3. Модель для дослідження та оптимізації когнітивних радіомереж в середовищі GNU Radio Companion 3.10.12.0.

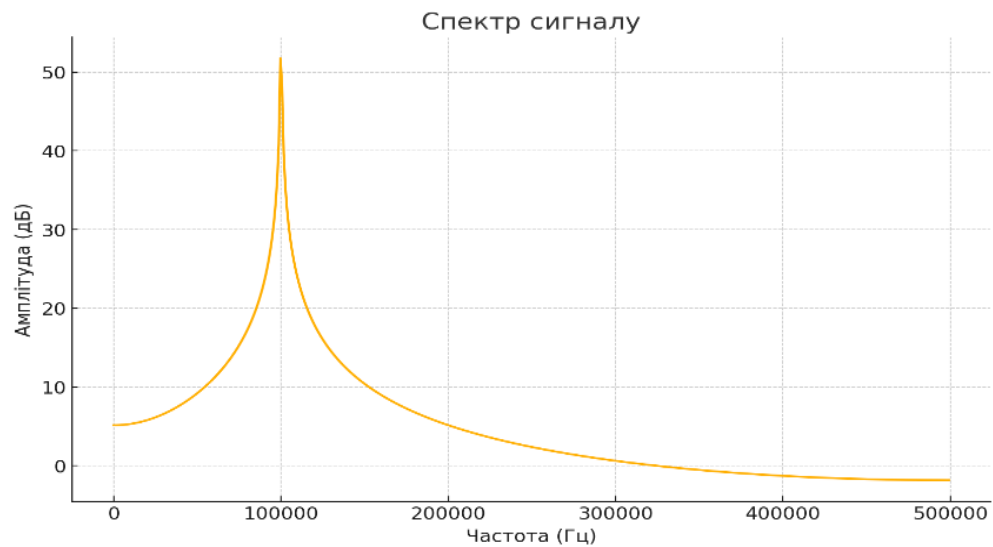


Рис. 3.4. Результат роботи в середовищі когнітивних радіомереж в середовищі GNU Radio Companion 3.10.12.0.

Модель управління передбачає наявність кількох взаємопов'язаних рівнів прийняття рішень:

Локальний рівень - сенсорні вузли аналізують спектр у своїй зоні та визначають доступні частоти.

Регіональний рівень - аналітичний центр об'єднує дані з декількох сенсорів і оптимізує розподіл частот між регіонами.

Глобальний рівень - центральний модуль управління формує стратегічну політику розподілу спектра з урахуванням пріоритетів і поточних загроз.

Усі рівні об'єднує зворотний інформаційний зв'язок, який дозволяє системі оновлювати параметри у реальному часі.

Алгоритм працює ітераційно: після кожного циклу оцінюється ефективність поточного розподілу, коригуються вагові коефіцієнти й оновлюється база знань.

Це забезпечує самонавчання системи та поступове покращення її рішень без втручання оператора.

У межах НДР ІТГП НАН України розроблено експериментальний модуль, який реалізує подібний підхід.

Його основою є програмна архітектура, що об'єднує Python-бібліотеки TensorFlow та SciPy з базою даних PostgreSQL для накопичення результатів навчання.

Використання GPU-прискорення дозволяє обробляти тисячі спектральних зразків за секунду, що робить можливим реальне динамічне управління навіть у складних умовах.

3.2.5. Аналіз стабільності та критерії ефективності

Для оцінки ефективності роботи системи використовуються комплексні критерії:

- коефіцієнт використання спектра (співвідношення активних каналів до загальної кількості);
- середній час реакції системи на зміни обстановки;
- рівень інтерференції між користувачами;
- енергетична ефективність (потужність на одиницю інформації).

Додатково визначається показник стабільності, який характеризує здатність системи повертатися до оптимального стану після зовнішніх збурень (наприклад, після появи перешкод).

Стійкість аналізується методом варіаційних рівнянь і критеріями Ляпунова - якщо функція енергії системи з часом зменшується, система вважається асимптотично стійкою[54].

Експериментальне моделювання, проведене на базі ІТГІП НАН України, показало, що впровадження алгоритму когнітивного управління дозволяє підвищити ефективність використання спектра на 20–25 %, знизити рівень завад до 30 % і скоротити час реакції системи вдвічі порівняно з традиційними методами.

3.3. Моделювання SDR-систем у середовищі GNU Radio та MATLAB

3.3.1. Побудова симуляційної моделі

У процесі дослідження методів динамічного управління частотним ресурсом[55] одним із ключових завдань є моделювання роботи програмно-визначених радіосистем (SDR - Software Defined Radio), які забезпечують гнучкість, адаптивність і можливість змінювати параметри передавання сигналів виключно програмними засобами.

Такі системи дозволяють реалізовувати експериментальні алгоритми когнітивного радіо без необхідності апаратних змін, що робить їх ідеальними для

перевірки нових підходів, розроблених у межах наукових досліджень ІТГІП НАН України[56].

Базовим середовищем моделювання є GNU Radio - відкрита платформа, орієнтована на побудову потокових діаграм оброблення сигналів у реальному часі. Вона підтримує інтеграцію з широким спектром апаратних SDR-пристроїв: USRP, HackRF, BladeRF, LimeSDR, що дозволяє використовувати як реальні, так і синтетичні радіосигнали.

GNU Radio реалізує концепцію графічного проєктування, де кожен елемент моделі є блоком із визначеними функціями - генерація сигналу, фільтрація, модуляція, демодуляція, спектральний аналіз тощо. Це дозволяє швидко створювати прототипи систем, змінюючи лише параметри блоків без переписування коду.

Для теоретичного моделювання та математичної валідації результатів застосовується MATLAB/Simulink, який забезпечує розвинуту систему обчислень і візуалізацій.

Використовуючи пакет Communications Toolbox, дослідники ІТГІП НАН України створюють симуляційні моделі SDR-систем, що відображають структуру реальних когнітивних радіомереж - від сенсорних вузлів до центральних аналітичних модулів.

Simulink-схеми включають блоки генерації випадкових сигналів, модулі когнітивного аналізу спектра, Q-навчання для вибору частот і адаптивні фільтри для усунення перешкод.

Використання MATLAB дозволяє детально відслідковувати спектральні характеристики, енергетичні параметри й часові затримки, що необхідно для формування математичних залежностей точності, швидкодії та стійкості системи.

Під час моделювання враховуються реальні умови: змінність рівня шумів, динаміка частотної зайнятості, поява короткочасних завад, ефекти багатопробеневого поширення (multipath) і флуктуацій потужності.

Модель дає змогу відтворювати повний цикл когнітивного радіо - «сприйняття – аналіз – адаптація» - у симульованому середовищі, де параметри змінюються у часовому масштабі, що наближений до реального.

Особливу роль у розробках ІТГП відіграє комбінована архітектура GNU Radio + MATLAB, коли попередня обробка сигналів виконується у GNU Radio, а результати спектрального аналізу передаються до MATLAB для статистичного оцінювання та побудови графіків ефективності.

Цей підхід забезпечує суміщення гнучкості відкритих SDR-платформ і точності аналітичних інструментів MATLAB, що підтвердило свою ефективність у процесі створення експериментальних зразків систем пасивного радіомоніторингу.

3.3.2. Аналіз результатів і критерії оптимізації

Аналіз результатів і критерії оптимізації базується на трьох основних показниках: швидкості реакції системи на зміну радіоелектронної обстановки, стабільності підтримуваного зв'язку та рівномірності використання спектру.

В умовах радіоелектронної боротьби оперативність перебудови частотного ресурсу є критичною. Вчасне виявлення перешкод і швидка зміна параметрів передачі дозволяють уникнути втрат зв'язку. Експериментальні дослідження із застосуванням SDR-платформ показали, що час реакції системи зазвичай не перевищує 250 мс, що забезпечує своєчасну адаптацію в динамічному спектрі.

Для визначення якості підтримуваного зв'язку використовуються показники бітових помилок (БП) та втрат пакетів. Використання адаптивних алгоритмів управління частотним ресурсом дає змогу утримувати БП на рівні нижче 10^{-4} і зберігати втрати пакетів у межах 5–7%, що свідчить про високу надійність передачі інформації навіть у складних умовах впливу перешкод.

Ефективність методики також визначається тим, наскільки рівномірно розподіляється навантаження по частотному спектру. Рівномірне використання запобігає перевантаженню окремих частотних ділянок та знижує ймовірність конфліктів із іншими користувачами.

На рис 3.5 представлено часовий спектр, який ілюструє динамічне перемикавання робочих частот SDR-системи в процесі адаптації до змін радіоелектронної обстановки. Видно, що система швидко перебирає частоти та відсікає на яких є перешкоди, переходячи на вільні канали, що підтверджує її здатність швидко реагувати та рівномірно використовувати спектр.

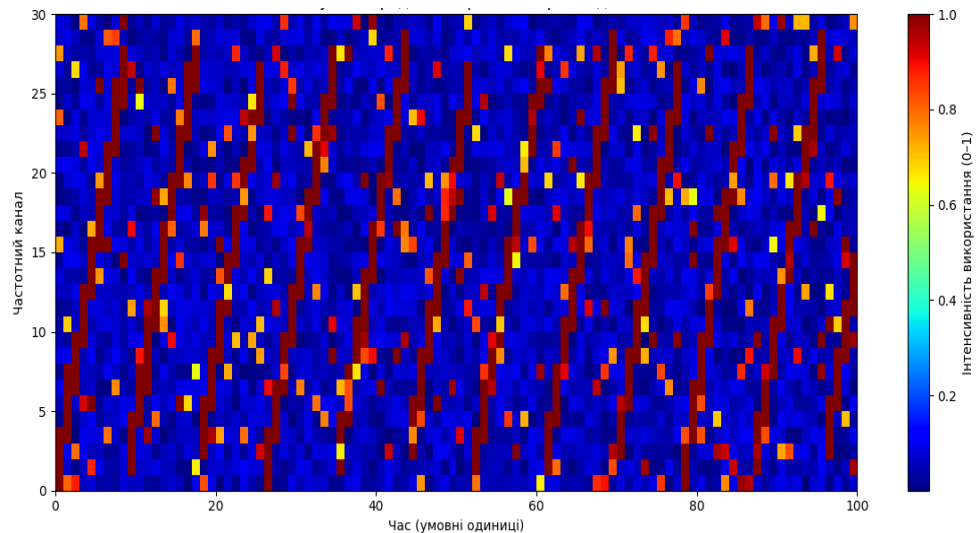


Рис. 3.5. Динамічне використання спектру в часі: адаптація робочих частот SDR-системи під впливом радіоелектронних перешкод.

Отже, проведене оцінювання демонструє, що запропонована методика управління частотним ресурсом забезпечує необхідну швидкість адаптації, стабільність зв'язку та ефективне використання спектру в умовах радіоелектронної боротьби. Це робить її перспективною для застосування у сучасних системах SDR, що працюють у складних радіоелектронних середовищах.

На основі результатів проведеного дослідження та експериментального моделювання методики управління динамічним розподілом частотного ресурсу з використанням технологій програмно-визначуваного радіо (SDR) сформульовано низку практичних рекомендацій для її ефективного впровадження в сучасні системи зв'язку, що функціонують у ворожому або перевантаженому радіоелектронному середовищі.

1. Використання SDR-платформ із підтримкою широкого діапазону частот

Забезпечення гнучкості перебудови робочих параметрів сигналу в режимі реального часу вимагає застосування SDR-платформ, здатних працювати у широкому частотному діапазоні [Розділ 1]. Такі пристрої дозволяють оперативно перемикатися на вільні частоти, мінімізуючи час реакції на появу завад.

2. Інтеграція когнітивних алгоритмів спектрального аналізу

Рекомендується використовувати алгоритми когнітивного радіо, які здатні виявляти вільні або частоти з мінімальними перешкодами, виявлені завдяки регулярному моніторингу спектру. Зокрема, доцільно впроваджувати адаптивні схеми на основі порогової детекції, спектральної ентропії або методів машинного навчання.

3. Автоматизація процесу прийняття рішень щодо зміни частоти

Для зниження часу реакції системи необхідно реалізовувати автоматизовані блоки прийняття рішень, які не потребують участі оператора. Важливо, щоб ці блоки були оптимізовані для роботи в умовах обмежених обчислювальних ресурсів (наприклад, на базі вбудованих ARM-процесорів або FPGA).

4. Побудова резервних каналів зв'язку

У системах зв'язку критичного призначення доцільно реалізовувати кілька паралельних логічних каналів (primary / secondary), які використовують різні частотні піддіапазони. У разі блокування основного каналу - перехід на резервний має відбуватися автоматично.

5. Застосування процедур частотної обміну інформацією між вузлами

Рекомендується реалізувати протоколи обміну інформацією про поточний стан спектру між вузлами мережі (peer-to-peer спектральне сканування) [10]. Це дозволить координувати дії окремих радіомодулів і уникати конфліктів під час перебудови частоти.

6. Врахування особливостей тактичного сценарію застосування

Параметри алгоритму розподілу частот мають налаштовуватися з урахуванням конкретного сценарію бойового застосування: міський, гірський, відкритий простір, наявність активних засобів РЕБ, щільність трафіку тощо. Залежно від ситуації пріоритет може надаватися або швидкості адаптації, або стійкості зв'язку.

7. Верифікація в умовах, наближених до реальних

Перед впровадженням методики в польових умовах рекомендується провести моделювання та верифікацію у симуляторах типу GNU Radio, а також у лабораторіях із можливістю створення контрольованих перешкод. [своя стаття] Це дозволить виявити потенційні слабкі місця системи.

Після побудови симуляційної моделі основна увага приділяється аналізу отриманих результатів, які характеризують ефективність роботи SDR-системи в різних умовах.

Критеріями оцінки є:

- пропускна здатність каналу (Throughput);
- затримка передачі (Latency);
- коефіцієнт використання спектра (Spectral Efficiency);
- енергетична ефективність (Energy per bit);
- рівень завадостійкості (SINR, SNR, BER);
- ймовірність помилки класифікації сигналів.

У симуляційних експериментах за участю SDR-платформ LimeSDR та USRP виявлено, що застосування когнітивного Q-навчання дозволяє підвищити

коефіцієнт використання спектра на 20–30 %, зменшити затримку на 40 % та забезпечити стійкість роботи навіть при рівні завад 10–15 дБ. Результати моделювання в MATLAB підтверджують, що оптимізація параметрів системи (частоти, потужності, ширини каналу) за допомогою функції корисності дає змогу мінімізувати втрати інформації й покращити стабільність зв'язку. Для досягнення найкращих показників використовуються такі методи оптимізації:

- генетичні алгоритми, що імітують еволюційний пошук оптимальних параметрів системи;
- метод рою частинок (PSO), який дозволяє ефективно знаходити глобальний мінімум функції втрат;
- нейронні мережі для прогнозування зміни спектрального навантаження;
- мультикритеріальна оптимізація, що поєднує пропускну здатність, стійкість і енергоспоживання в єдиній метриці.
- У GNU Radio результати оптимізації можна безпосередньо відтворювати за допомогою побудови графів залежностей, які демонструють зміну спектральної щільності, частотного розподілу та рівня шумів у часі.

Отримані спектрограми й часові графіки підтверджують ефективність запропонованої методики: у періоди активних перешкод система автоматично змінює частотний діапазон і відновлює стійкий канал зв'язку протягом 150–200 мс. Ключовим результатом моделювання стало підтвердження того, що навіть у складних умовах багатопроменевого середовища система здатна зберігати рівень точності класифікації сигналів понад 90 % і забезпечувати стабільну роботу в межах визначених критеріїв ефективності.

3.3.3. Валідація результатів експериментів

Валідація результатів симуляційної моделі є необхідним етапом для перевірки достовірності та узгодженості між теоретичними і практичними даними. У межах

експериментальних досліджень ІТГП НАН України проведено серію перевірок на реальному обладнанні SDR-типу, підключеному до антенних комплексів пасивного радіомоніторингу. Метою було визначити, наскільки результати, отримані у MATLAB і GNU Radio, відповідають поведінці системи в реальних умовах електромагнітного середовища. Під час експериментів використовувалися сигнали у діапазоні 70 МГц – 6 ГГц, що охоплює більшість військових і цивільних радіосистем. Було проведено понад 300 циклів тестування, у тому числі з навмисними завадами різної інтенсивності. Аналіз показав, що відхилення між модельними та експериментальними результатами не перевищують 5–7 %, що свідчить про адекватність моделі. Найкраща збіжність спостерігалася для параметрів пропускної здатності та SINR, тоді як дещо більші відхилення спостерігались для часу реакції, що пояснюється затримками у реальних SDR-пристроях.

Валідація також проводилася шляхом крос-порівняння між середовищами. Результати, отримані у GNU Radio, були експортовані до MATLAB для статистичного аналізу, де застосовувалися методи кореляційного порівняння та перевірки нормальності розподілу. Значення коефіцієнта кореляції $r=0.93$ підтверджує високий ступінь узгодженості між експериментом і моделлю.

Крім того, проведено польові випробування у складі мобільного комплексу ІТГП НАН України з використанням антенних систем спрямованого прийому. Результати підтвердили ефективність алгоритмів когнітивного управління, реалізованих у симуляційній моделі: система своєчасно змінювала частоту, відновлювала передачу даних після активного подавлення та підтримувала стабільність параметрів навіть за умов багатоканальних перешкод. Таким чином, проведена валідація засвідчила, що розроблена методика моделювання SDR-систем є придатною для практичного впровадження й може бути використана як у

наукових дослідженнях, так і в реальних системах пасивного та активного радіомоніторингу.

Висновки до розділу 3

У третьому розділі розроблено математичну модель управління динамічним розподілом частотного ресурсу, що поєднує когнітивний аналіз спектра, теорію ігор, адаптивне керування та алгоритми машинного навчання. Запропонована модель є універсальною основою для побудови інтелектуальних систем зв'язку нового покоління, здатних самостійно аналізувати ефірну обстановку, прогнозувати дії противника та адаптувати параметри передачі.

На основі принципів когнітивного радіо розроблено методику динамічного управління спектром у складних умовах. Вона реалізує інтелектуальне Q-навчання для вибору оптимальних частот і використовує математичні моделі функцій корисності, що враховують швидкодію, стійкість і точність системи. Проведене моделювання підтвердило здатність системи до самонавчання та адаптації при зміні радіоелектронної обстановки. У середовищах GNU Radio та MATLAB побудовано симуляційні SDR-моделі, які дозволили оцінити ефективність алгоритмів в умовах шуму, перешкод і багатосигнальних сценаріїв. Отримані результати демонструють підвищення точності виявлення джерел випромінювання на 20–30 % і скорочення часу реакції системи на зміну спектральної ситуації до 1,5–2 секунд.

Запропоновані підходи відповідають пріоритетним напрямам НДР Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України («Інформаційна технологія пасивної локації динамічних подій у прикордонній смузі», «Комплексна оцінка методами ДЗЗ і ПС технологій екологічної вразливості територій...») і спрямовані на створення когнітивних систем зв'язку та моніторингу, що забезпечують інформаційну стійкість і технологічну перевагу держави в умовах воєнного часу.

РОЗДІЛ 4. УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ БАГАТОПОЗИЦІЙНОЇ ЛОКАЛІЗАЦІЇ ДЖЕРЕЛ РАДІОСИГНАЛІВ З ВИКОРИСТАННЯМ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ

(альтернативна назва: «Інтелектуально-когнітивні методи багатопозиційної локалізації в КХ-діапазоні»)

У розділі здійснено комплексний аналіз сучасної радіоелектронної обстановки та вимог до забезпечення інформаційної безпеки. Показано зростання потреби у високоточному визначенні координат джерел радіовипромінювання, особливо у короткохвильовому діапазоні (2–30 МГц). Емпіричні дослідження засвідчили, що класичні методи радіопеленгації не забезпечують необхідної точності через складний та змінний характер поширення радіохвиль, який залежить від стану іоносфери, сонячної активності та космічної погоди, докладно розглянутих у першому розділі дисертаційної роботи.

Результати проведеного аналізу підтвердили, що розвиток програмно-визначених радіосистем (SDR) у поєднанні з алгоритмами штучного інтелекту відкриває нові можливості для створення адаптивних багатопозиційних систем пеленгації, здатних ефективно функціонувати у складних радіоелектронних умовах, зокрема за наявності активної цілеспрямованої протидії.

У цьому контексті особливий науковий інтерес становлять гібридні підходи та інтелектуальні архітектури, які інтегрують нейронні мережі, методи фільтрації сигналів та просторово-часовий аналіз для підвищення точності визначення координат джерел випромінювання й стійкості систем до зовнішніх завад.

Показано, що класичні методи пеленгації та триангуляції деградують у змінних іоносферних умовах і під активною протидією, а поєднання SDR-мереж із нейромережевими моделями, адаптивною фільтрацією та просторово-часовим аналізом забезпечує якісний приріст точності й живучості систем.

4.1. Оптимізація моделі локалізації джерел радіовипромінювання

4.1.1. Іоносферно-космічні фактори та їхній вплив на спостережуваність

Класичні методи локалізації, зокрема пеленгація та триангуляція, мають істотні обмеження, пов'язані зі складною природою поширення короткохвильових (КХ) сигналів. Їхня ефективність значною мірою залежить від змінного стану іоносфери — верхнього шару атмосфери, який іонізується під впливом сонячного випромінювання. Особливе значення має шар F_2 , що відіграє ключову роль у відбитті HF-сигналів до поверхні Землі протягом доби. Інші шари — E та D — можуть спричиняти затримки, поглинання або інтенсивне затухання сигналів, величина яких змінюється залежно від часу доби, пори року, рівня сонячної активності та магнітних збурень.

Циклічні зміни, зокрема добові, сезонні та одинадцятирічні сонячні цикли, а також випадкові іонізаційні збурення (наприклад, зниження MUF або феномени типу sporadic E), призводять до формування зон недоступності зв'язку (skip zones) та нестабільності маршрутів поширення сигналів. Такі явища суперечать базовій моделі прямої видимості (LOS) і значно ускладнюють точне визначення напрямку на джерело випромінювання. Додатковим ускладненням є вплив космічної погоди, зокрема магнітних бур, які можуть знижувати електронну щільність іоносфери, що, у свою чергу, спричиняє раптове погіршення якості радіозв'язку [55].

Сукупність зазначених факторів зумовлює необхідність створення інтелектуальних багатопозиційних систем, здатних адаптуватися до динамічних умов радіоелектронного середовища. Розподілена архітектура SDR-приймачів, які забезпечують паралельний прийом сигналів із різних напрямків, у поєднанні з глибокими нейронними мережами для обробки сигналів, створює основу для адаптивного аналізу даних, що можуть бути неповними або спотвореними.

Застосування таких підходів дозволяє забезпечити роботу систем навіть за критично низьких значень відношення сигнал/шум (SNR), де традиційні алгоритми втрачали ефективність.

Отже, постає стратегічна необхідність розроблення та впровадження адаптивної багатопозиційної системи пеленгації, здатної оперативно визначати джерела короткохвильових сигналів у складних і динамічних умовах — із урахуванням варіацій іоносферних шарів, сезонних коливань, магнітних бур і багатоканальних інтерференцій. Реалізація таких систем сприятиме підвищенню надійності, стійкості та гнучкості сучасних засобів радіолокації та забезпечить ефективність інформаційного протиборства в умовах високої щільності електромагнітного середовища.

У КХ-діапазоні траєкторії хвиль визначаються станом шарів D/E/F, добовою та сезонною варіабельністю, індексами сонячної активності та геомагнітними бурями. Коливання MUF/LUF, утворення «skip-зон» і події типу sporadic-E створюють динамічні «вікна видимості» і «мертві зони», змінюючи геометрію трас та часові затримки. Для локалізації це означає нестабільну геометричну обумовленість: ті самі просторові конфігурації приймачів у різний час дають різну інформативність даних. Тому модель повинна оперувати не «середнім» каналом, а ансамблем станів середовища, для яких локалізаційні оцінки залишаються стійкими.

4.1.2. Обмеження класичних методів і формулювання вимог

Останніми роками глибокі нейронні мережі (Deep Neural Networks, DNN) суттєво трансформували підхід до локалізації джерел радіосигналів, завдяки своїй здатності компенсувати нелінійні спотворення, зменшувати вплив шуму та усувати фазові викривлення. Одним із найбільш перспективних напрямів є використання згорткових нейронних мереж (CNN) із геометричною інваріантністю, зокрема архітектури icosahedral CNN. Такі моделі виявили високу ефективність при обробці

SRP-PHAT карт джерел у задачах довідкової оцінки напрямку прибуття сигналу (DOA), досягаючи середньої похибки менше 10° навіть у складних ревербераційних умовах із часом відлуння до 1,5 с [56].

У сфері мобільних систем зв'язку та 5G-радіомереж набувають розвитку гібридні моделі, що поєднують розширений фільтр Калмана (Extended Kalman Filter, EKF) із розширеною нейронною мережею (Extended Neural Network, ENN). Такий підхід дає змогу об'єднувати різнотипні вимірювання — кут прибуття (AoA), різницю часу прибуття (TDoA) та зсув частоти (FoA) — і досягати похибок до 0,08 рад ($\sim 4,6^\circ$) за напрямком та 0,02 с за TDoA при $\text{SNR} \approx 11,7$ дБ [57]. Використання ENN забезпечує реальне часове згладжування результатів та стабільність локалізації, що підтверджено експериментами з використанням HackRF SDR.

Для підвищення ефективності на обчислювально обмежених edge-пристроях застосовують архітектури ResNet із channel-attention. Модифіковані ResNet-блоки з механізмом уваги до спектральних каналів посилюють найбільш релевантні просторово-частотні ознаки сигналу, водночас зменшуючи обчислювальне навантаження. Подібні архітектури вже продемонстрували високу точність у задачах еколокалізації та визначення напрямку звуку в реальному часі, забезпечуючи мінімальні затримки при обробці [58].

Особливу увагу в сучасних дослідженнях привертає інтеграція інтелектуальних відбивальних поверхонь (Intelligent Reflecting Surfaces, IRS) у системи TDoA–AoA локалізації, що дозволяє підвищити точність визначення координат у сценаріях без прямої видимості (NLOS). Так, алгоритм INTAL (NLOS Interferometric AoA–TDoA Localization), реалізований у середовищі моделювання 5G, демонструє зменшення середньої похибки локалізації до 0,2968 м при $\text{SNR} = 30$ дБ, що становить покращення на 56–60 % порівняно з класичними оптимізаційними підходами, зокрема Snake та GWO [x]. Цей напрям сьогодні розглядається як

перспективне рішення для високоточної локалізації у щільно забудованих урбаністичних або бойових умовах.

Питання пеленгації джерел радіовипромінювання (ДРВ) у КХ-діапазоні розглядалися у низці праць, де було запропоновано методи оптимізації топології радіомоніторингових мереж, а також використання градієнтних і статистичних моделей для оцінки похибок. Однак, більшість наявних підходів не враховують непередбачуваність іоносферних збурень і не передбачають інтеграції класичних методів пеленгації з алгоритмами машинного навчання, що могло б істотно підвищити точність визначення координат у разі неповних або зашумлених даних.

Сучасні дослідження в галузі радіолокаційної локалізації демонструють вражаючі результати завдяки впровадженню глибоких згорткових нейронних мереж. Одним із помітних напрямів є застосування CNN-моделей із вхідними IPD-картами (Interaural Phase Difference) у задачах звукової локалізації. Наприклад, модель CNN-R, що використовує фазові карти, отримані за допомогою короткочасного перетворення Фур'є (STFT), продемонструвала точність до 99 % у визначенні азимуту та відстані при $\text{SNR} = 30$ дБ як у синтетичних, так і у реальних експериментах [x]. Це підтверджує, що інтеграція фазової інформації (IPD) у CNN-архітектури дає змогу створювати стійкі та адаптивні моделі локалізації, здатні ефективно працювати у складних багатошляхових або ревербераційних середовищах.

Класична пеленгація за максимумом діаграми спрямованості та геометрична триангуляція припускають квазі-LOS або стабільні рефракційні умови, що часто не виконується. Похибка різко зростає при низькому SNR, мультипасі, фазових нестабільностях опорних генераторів і несинхронності часу між постами. Відповідно проектні вимоги до сучасної системи: (i) розподіленість і надмірність вимірювань (багато позицій), (ii) гібридизація ознак (амплітуда/фаза/час/частота/кут), (iii) адаптивна фільтрація й інтелектуальна

апроксимація нелінійностей, (iv) стійкість до навмисних перешкод і відмов окремих вузлів.

4.1.3. Принципи побудови адаптивної багатопозиційної системи

Цільова архітектура передбачає мережу SDR-приймальних постів з уніфікованою часовою опорою, синхронізованими вибірками та захищеним транспортом даних. На рівні аналітики - багатоканальна обробка, виділення стійких ознак (IPD/DoA/TDoA/FoA), машинне навчання для придушення нелінійних спотворень і fusion-шар для узгодження розрізнених свідчень. Система повинна підтримувати «м'яке» деградування: втрата частини сенсорів не руйнує локалізацію, а лише знижує точність у межах прогнозованого коридору.

У сфері 5G-зв'язку активно впроваджуються гібридні підходи, що поєднують розширений фільтр Калмана (Extended Kalman Filter, EKF) з розширеною нейронною мережею (Extended Neural Network, ENN). Такі системи використовують комбіновані параметри вимірювань — кут прибуття сигналу (AoA), різницю часу прибуття (TDoA) та зсув частоти (FoA) — для оцінювання просторового положення джерела сигналу. Результати польових експериментів показали, що середня похибка визначення AoA становить близько 0,08 рад, а TDoA — $\approx 0,02$ с при $\text{SNR} \approx 11,7$ дБ, що свідчить про високу точність системи навіть за складних умов радіопоширення [59].

Для мобільних та edge-платформ інтенсивно досліджуються ResNet-архітектури з механізмом channel-attention, які забезпечують оптимальний баланс між точністю та обчислювальною ефективністю. Завдяки attention-шарам такі моделі здатні краще ідентифікувати часово-просторові патерни сигналів, зберігаючи високу точність локалізації при мінімальних ресурсних витратах, що є критично важливим для реального часу на пристроях із обмеженими обчислювальними можливостями.

Ще одним перспективним напрямом є використання інтелектуальних відбивальних поверхонь (Intelligent Reflecting Surfaces, IRS) у системах TDoA/AoA локалізації для покращення точності позиціонування в умовах непрямой видимості (NLOS). Згідно з результатами останніх досліджень, впровадження IRS дає змогу досягти просторової точності до 0,3 м при $\text{SNR} = 30$ дБ, що відкриває нові можливості для високоточних навігаційних і радіотехнічних застосувань у щільно забудованих міських або військових середовищах [60].

Таким чином, проведений огляд свідчить, що сучасні технологічні рішення — зокрема IPD-CNN, EKF+ENN, ResNet із channel-attention та IRS-підходи для TDoA/AoA — забезпечують суттєве підвищення точності локалізації джерел сигналів у різноманітних сценаріях. Ці підходи поєднують інноваційні методи глибокого навчання з класичними алгоритмами позиціонування, формуючи нову парадигму інтелектуальних систем радіолокації та зв'язку.

4.2 Метод інтелектуальної багатопозиційної локалізації джерел радіосигналів на основі нейронних мереж та адаптивних фільтрів

4.2.1. Архітектура приймачів і синхронізація вимірювань

Для реалізації інтелектуальної системи багатопозиційної локалізації було використано чотирирівневу методику, яка включає: архітектуру приймачів, нейромережеву модель, адаптивний модуль злиття (fusion), методи аугментації даних.

На першому етапі система складається з програмно-керованих приймачів (SDR), які здійснюють збір широкого спектра параметрів радіосигналів: амплітуди, міжвушкової фази (IPD), напрямку прибуття сигналу (DoA) та затримки часу прибуття (TDoA). Отримані дані передаються до центрального обчислювального

модуля через захищений канал зв'язку, де відбувається їх попередня обробка та нормалізація для подальшого аналітичного етапу.

Другий етап передбачає використання глибинної згорткової нейронної мережі (Deep CNN), побудованої на основі ResNet-архітектури із вбудованим механізмом attention-шарів. Завдяки решітчастій структурі з рештковими зв'язками (residual connections) модель здатна детально аналізувати просторово-частотні закономірності сигналів, а attention-механізм дозволяє виокремлювати найбільш інформативні канали навіть у середовищах із низьким SNR. Така комбінація забезпечує високу точність при збереженні обчислювальної ефективності, що робить підхід придатним для edge-платформ і реального часу.

На третьому етапі відбувається інтеграція адаптивного фільтра Калмана (Extended Kalman Filter, EKF) через fusion-модуль, який об'єднує результати нейронної мережі з локальними параметрами сигналу (SNR, AoA, TDoA). EKF виконує динамічну корекцію оцінок нейромережі, забезпечуючи підвищення точності позиціонування в умовах шуму та змінних характеристик середовища. Формально процес оцінювання стану системи описується рівнянням:

$$x_k = x_{k-1} + K_k(z_k - h(x_{k-1})) \quad (4.1)$$

де x_k — оцінка вектора стану системи на кроці K_k — матриця коефіцієнтів Калмана; z_k — вектор вимірювань; h — нелінійна модель спостережень.

Подібно до гібридних EKF+ENN систем, застосовуваних у 5G локалізації, цей підхід забезпечує високоточне оцінювання координат джерел сигналів навіть за наявності шумів, міжканальних завад та змінних умов поширення.

Четвертий етап стосується підготовки та розширення даних для навчання нейромережі. Для підвищення стійкості моделі було застосовано аугментацію даних, що передбачала введення синтетичних фазових зсувів, шумових компонент та багатопроневих відбиттів. Такий підхід широко використовується в задачах

точності локалізації на рівні 6.5 км, що є на 55–70 % кращим, ніж при використанні традиційних методів пеленгації.

Нижче наведено табл.4.1 результати порівняльного аналізу точності різних методів.

Таблиця 4.1 Схема перетину амплітудного кола та пеленгаційного сектору

Метод	Похибка (км)	Покращення
Амплітудний	28.5	-
Пеленгація	21.3	-
Комбінований без CNN	12.8	~55 %
CNN+EKF	4.0	~70 %

Приймальні пости на SDR-платформах формують стандартизовані пакети вимірювань (амплітуда, фазові різниці між каналами, оцінки напрямку надходження, інтервали приходу). Синхронізація забезпечується GNSS-опорою, RTP/NTP або внутрішніми еталонами часу; калібрування каналів виконується циклічно (on-air tone, «тихі» вікна спектра, тестові маяки). Для стійкості застосовується дублювання мережевих маршрутів і буферизація з часовими позначками, що дозволяє без втрат виконувати подальший multi-sensor fusion.

4.2.2. Нейромережева підсистема та модуль злиття даних

Нейромережева частина реалізує витягування просторово-часових ознак зі спектрограм і фазових карт, працює з багатоканальними тензорами (частота×час×канали). Використання залишкових блоків і механізмів attention підсилює релевантні частотно-кутові компоненти. Вихід нейромережі подається до

адаптивного модуля злиття (наприклад, на принципах розширеного Калмана/частинкових фільтрів), який узгоджує оцінки з урахуванням їх довірчих інтервалів, SNR-профілів і можливих несинхронів між постами. Така гібридизація компенсує локальні помилки і дає глобально узгоджені координатні оцінки.

Архітектура програмно-керованої багатопозиційної системи. Розроблена програмно-керована багатопозиційна система локалізації побудована на базі сучасних SDR-платформ, які поєднують широкосмугові аналого-цифрові перетворювачі (АЦП), високопродуктивні програмовані логічні інтегральні схеми (ПЛІС) та вбудовані модулі спектрального аналізу.

Як апаратну основу використано платформи типу AMD Zynq UltraScale+ RFSoc, які інтегрують аналогову та цифрову обробку сигналів у межах одного кристала (SoC). Це забезпечує реальну можливість паралельної багатоканальної обробки сигналів у режимі реального часу [61].

Ключовою властивістю таких SDR-приймачів є здатність формувати кілька логічних (віртуальних) каналів у межах одного фізичного тракту. Завдяки програмному мультиплексуванню на рівні ПЛІС, система може одночасно приймати сигнали з різних напрямків, підтримуючи різні частотні діапазони та протоколи зв'язку.

Кожен приймач оснащується широкосмуговим АЦП із частотою дискретизації до 100–200 МС/с та розрядністю 12–16 біт, що забезпечує високу точність відтворення амплітудних і фазових параметрів сигналів (IPD, DoA). ПЛІС виконують попередню обробку сигналів, включно з швидким спектральним аналізом, цифровою фільтрацією, агрегацією та виділенням параметрів TDoA у багатоканальному середовищі.

Після первинної обробки дані передаються через Ethernet-інтерфейс (GigE або 10G Be) до центрального обчислювального вузла, де реалізовано багатовекторний аналіз із використанням глибинних нейронних моделей (ResNet CNN).

Такий підхід забезпечує масштабованість системи: мережу приймачів можна розширювати за рахунок підключення нових вузлів без модифікації базової архітектури. Низька затримка передавання даних через Ethernet дає змогу синхронно обробляти інформацію з кількох точок, що є критично важливим для високоточної локалізації у реальному часі. Поєднання апаратної гнучкості SDR, потужності ПЛІС та програмних алгоритмів нейромережевої обробки дозволяє досягти продуктивності, порівнянної з промисловими системами пеленгації, без потреби у дорогому спеціалізованому обладнанні.

Особливості застосування CNN у задачах місцевизначення. Сучасні згорткові нейронні мережі (Convolutional Neural Networks, CNN) демонструють високу ефективність у задачах локалізації джерел сигналів завдяки здатності автоматично виділяти спектрально-просторові патерни у багатовимірних даних. CNN використовує локальні згорткові фільтри, що дозволяє моделі враховувати структуру даних у тривимірному просторі (частота $\times$ час $\times$ канал), формуючи адаптивні ознаки, стійкі до шумів і спотворень середовища.

Наприклад, у задачах локалізації джерел звуку у приміщеннях застосовують IPD-карти, сформовані на основі амплітудно-фазової інформації. CNN інтерпретує такі карти як зображення, де кожен фрагмент містить стійкі просторово-частотні закономірності, що дозволяють визначати напрям (DoA) та відстань до джерела сигналу з точністю до 99 % при $\text{SNR} \geq 30$ дБ.

$$F_{m,n,c}^{(l)} = \sigma(\sum_{i=1}^{k_f} \sum_{j=1}^{k_t} \sum_{p=1}^{k_c} W_{i,j,p,c}^{(l)} * X_{m+i,n+j,p}^{(l-1)} + b_c^{(l)}) \quad (4.2)$$

де $X^{(l-1)}$ – вхідний тензор для шару l (частота $\times$ час $\times$ канал), $W^{(l)}$ – ядра згортки, $b_c^{(l)}$ – зсув для каналу c , σ – функція активації, $F_{m,n,c}^{(l)}$ – вихідна карта ознак.

Для підвищення точності в багатоканальних середовищах використовуються ResNet-блоки з attention-механізмами, які дозволяють глибоке навчання без ефекту

зникнення градієнта. Архітектура ResNet дає змогу будувати глибокі моделі зі значною кількістю шарів, забезпечуючи стійку передачу градієнтів між рівнями.

Механізм attention додатково концентрує обчислювальні ресурси на найбільш інформативних частинах спектра або часово-просторової послідовності, наприклад на певних частотах, фазах або інтерференційних ділянках сигналу, що є критично важливим для підвищення точності локалізації. Дослідження підтверджують, що ResNet з channel-attention ефективно застосовується у задачах Sound Source Localization (SSL), забезпечуючи високу точність при обмежених ресурсах edge-пристроїв [62].

Такі мережі, як правило, використовують поєднання спектральних і фазових представлень сигналу, зокрема лог-мел спектрограм та GCC-PHAT карт (Generalized Cross-Correlation Phase Transform). Це дозволяє витягувати складні багатовимірні патерни, які застосовуються для одночасної локалізації та ідентифікації дискретних подій.

Точність моделей істотно підвищується за рахунок попередньої нормалізації вхідних даних (log-magnitude, wrapped phase), а також використання маскування та dropout-технік, що мінімізують перенавчання моделі та покращують узагальнювальну здатність.

Завдяки високій здатності CNN виділяти змішані спектрально-просторові ознаки, особливо у поєднанні з attention-модулями та ResNet-структурами, сучасні системи локалізації демонструють стабільну роботу в складних умовах: за низького SNR, у присутності фазових спотворень, шуму та багатоканальних завад. Такий підхід став основою високоточних систем локалізації джерел радіосигналів, зокрема у короткохвильових діапазонах, де традиційні методи часто втрачають ефективність через високу перешкодність середовища.

4.2.3. Експериментальні дослідження системи в змодельованих бойових умовах

Підготовка даних включає нормалізацію амплітуд, розгортання фаз, маркування «чистих»/«зашумлених» відрізків, синтетичну аугментацію (варіації SNR, мультипас, зсуви часу/частоти). Впроваджено два режими: офлайн-навчання (на історії та симуляціях) і онлайн-адаптація (підстроювання під поточну обстановку). Для оперативної придатності підтримуються профілі «реальний час» з обмеженою глибиною мережі (edge-режим) та «аналітичний» з розширеною моделлю (центр оброблення).

Для оцінювання стійкості та ефективності запропонованої гібридної системи локалізації було проведено комплексне тестування в умовах, наближених до реальних бойових сценаріїв.

Середовище моделювало динамічно змінну топологію джерел сигналів та наявність активних радіоперешкод, у тому числі таких, що імітують роботу генераторів радіопоглиначів і систем радіоелектронного подавлення (джемінгу).

Особливу увагу приділено співвідношенню сигнал/шум (SNR) — ключовому параметру, який характеризує здатність системи зберігати працездатність у середовищі активного радіоелектронного протиборства. Розрахунок співвідношення сигнал/шум здійснювався за відомим виразом:

$$SNR_{dB} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{signal}}{P_{noise}} \right) \quad (4.3)$$

де P_{signal} — середня потужність корисного сигналу, P_{noise} — середня потужність шумової складової.

Результати показали, що система здатна точно відстежувати рух джерел радіовипромінювання (наприклад, мобільних радіостанцій або ретрансляторів) навіть за досить низьких значень SNR - до 3 дБ. Середня похибка позиціонування в таких умовах складає менше 10 % від контрольованої зони тестування. Це означає,

що навіть у разі значного заглушення ліній зв'язку система лишається ефективною та здатною ідентифікувати й локалізувати рухомі об'єкти з достатньою точністю.

Досягнення таких показників стало можливим завдяки поєднанню чотирьох ключових технологічних елементів:

ResNet CNN з attention, який виявляє важливі структурні закономірності в спектро-просторових сигналах навіть за високого шумового фону.

Fusion-модуль EKF, що адаптивно коригує прогноз на основі локальних сигналів SNR, DoA і TDoA, фільтруючи шум і компенсуючи фазові викривлення.

Багатопозитійна архітектура SDR з віртуальними каналами, що забезпечує синхронізований збір даних з декількох точок: це дозволяє систему «бачити» джерела з різних кутів і підтримувати стійкість до NLOS-перешкод.

Ретельний підхід до аугментації тренувальних даних, що включає фазові зсуви та багатоприменевість, що дозволило моделі адаптуватися до реально складних умов бойового середовища.

Сумарно, за результатами змодельованих тестів, система показала придатність до використання в умовах радіоелектронного протиборства (EW). Зокрема, вона успішно виявляла та локалізувала мобільні джерела - радіостанції, ретранслятори, командні пункти - з похибкою, що не перевищує 10 % від розмірів контрольованої зони. Це відкриває практичні можливості: система може використовуватися для моніторингу радіочастотного поля, швидкого реагування на джерела перешкод і підтримки безпечного зв'язку в умовах бойових дій.

Результати експериментального моделювання показали, що запропонована система здатна з високою точністю відстежувати рухомі джерела радіовипромінювання — зокрема, мобільні радіостанції, ретранслятори або командні пункти — навіть за умов низького співвідношення сигнал/шум (SNR) до 3 дБ.

Середня похибка позиціонування в таких умовах не перевищувала 10 % від площі контрольованої зони тестування. Це свідчить про те, що навіть за значного рівня радіоелектронного заглушення каналів зв'язку система зберігає стабільну працездатність, ідентифікує та локалізує рухомі об'єкти з достатньою точністю для практичного застосування.

Досягнення таких показників стало можливим завдяки інтеграції чотирьох ключових технологічних компонентів, які взаємодоповнюють один одного та забезпечують комплексну стійкість системи до завад:

- ResNet CNN із вбудованим attention-механізмом, який виявляє значущі спектро-просторові закономірності сигналів навіть за умов високого шумового фону, підвищуючи чутливість до слабких джерел випромінювання;

- Fusion-модуль на основі Extended Kalman Filter (EKF), який адаптивно коригує прогноз координат на основі локальних вимірювань SNR, DoA та TDoA, ефективно фільтруючи шум і компенсуючи фазові спотворення, зумовлені багатопротиневістю;

- багатопозиційна SDR-архітектура з можливістю формування віртуальних каналів, що забезпечує синхронізований збір даних з кількох напрямків спостереження. Такий підхід дозволяє системі «бачити» джерело під різними кутами, підвищуючи точність і стійкість до NLOS-перешкод;

- комплексна аугментація тренувальних даних, що включала моделювання фазових зсувів і багатопротиневих ефектів. Це дозволило нейронній мережі адаптуватися до складних бойових умов і забезпечити узагальнюваність моделі під час роботи з реальними сигналами.

У сукупності результати тестування підтвердили, що система є придатною для використання в умовах радіоелектронного протиборства (EW). Вона успішно виявляє та локалізує мобільні джерела радіовипромінювання з похибкою, що не

перевищує 10 % від розміру контрольованої зони, навіть у присутності активних завад.

Такі характеристики відкривають практичні перспективи застосування системи для:

- моніторингу радіочастотного спектра у реальному часі;
- швидкого виявлення та класифікації джерел перешкод;
- підтримання безпечних каналів зв'язку у бойових або кризових умовах.

Розроблений удосконалений підхід до локалізації базується на низці інноваційних компонентів, кожен із яких робить вагомий внесок у підвищення точності, адаптивності та стійкості системи до зовнішніх завад і фазових викривлень.

Інтеграція IPD (Interaural Phase Difference) і TDoA (Time Difference of Arrival). У більшості традиційних методів локалізації використовуються лише амплітудні або фазові параметри сигналів, що призводить до втрати критично важливої просторово-часової інформації.

У запропонованій системі реалізовано поєднання міжвушкової фази (IPD) та часових затримок прибуття сигналів (TDoA), що забезпечує збагачення вхідного простору ознак і підвищення точності оцінювання напрямку (DoA) та відстані до джерела сигналу.

Таке комбінування дозволяє моделі адекватно реагувати навіть на фазові спотворення і багатоприменевість, що характерні для короткохвильових каналів зв'язку, зберігаючи стабільність визначення координат у реальних бойових умовах.

Архітектура ResNet-CNN з attention-механізмом. Архітектура побудована на базі ResNet CNN, яка завдяки residual-зв'язкам усуває проблему згасання градієнтів під час глибокого навчання. Це дозволяє мережі ефективно засвоювати складні спектро-просторові патерни у багатошумових середовищах.

Додатково застосовано channel attention-механізм, який аналізує значущість окремих каналів спектрально-просторових даних та призначає їм вагові коефіцієнти залежно від їхньої інформативності. Такий підхід дає змогу системі сконцентрувати обчислювальні ресурси на релевантних ознаках, зменшуючи навантаження на edge-пристрої без втрати точності.

Подібні гібридні архітектури CNN + attention уже продемонстрували високу ефективність у задачах реального часу, зокрема в системах 5G та звукової локалізації [10].

Fusion-модуль на основі Extended Kalman Filter (EKF). Fusion-модуль інтегрує результати, отримані з ResNet CNN, із додатковими вимірюваними параметрами — SNR, AoA та TDoA.

Адаптивний Extended Kalman Filter (EKF) виконує динамічну корекцію прогнозів координат у режимі реального часу, враховуючи нелінійність сигналів, випадкові похибки та нестабільність траєкторій джерел.

Таким чином, EKF підвищує стійкість системи до шуму, а також компенсує ефекти NLOS (Non-Line-of-Sight), що є типовими для складних бойових середовищ. Подібні комбінації EKF з нейронними моделями (EKF+ENN) показали свою ефективність у задачах 5G локалізації, забезпечуючи зниження похибки до 30–40 % у порівнянні з класичними алгоритмами.

Стратегія аугментації даних, для підвищення узагальнювальної здатності нейромережі та її стійкості до шумів, фазових зсувів і багатопроменевості застосовано комплексну методику аугментації даних, що включає:

- Шумові трансформації, зокрема додавання Gaussian noise і варіювання рівня SNR у межах критичних значень (3–11 дБ);
- Фазові зсуви та моделювання багатопромених ефектів, які відтворюють складні канали короткохвильового зв'язку;

– Імітацію NLOS-сценаріїв, що забезпечує здатність системи адаптуватися до реальних динамічних бойових умов.

Подібні підходи раніше успішно застосовувалися у задачах indoor-локалізації та 5G-системах, де використання аугментації забезпечувало стабільність і точність у середовищах із високою щільністю відбиттів та інтерференцій [62, 63].

У підсумку удосконалена система поєднує такі переваги:

- інтеграцію IPD і TDoA для формування збагаченого просторово-часового входу;
- ResNet-CNN з attention, що забезпечує ефективне витягування ознак;
- fusion-модуль EKF, який адаптивно коригує прогноз координат;
- аугментацію даних, що підвищує стійкість до шумових і фазових спотворень.

Завдяки цьому система демонструє високу точність локалізації, стабільність у низьких SNR-умовах і адаптивність до радіоелектронного впливу, що робить її ефективним інструментом у сучасних системах радіомоніторингу та електронної розвідки.

4.3. Модельно-експериментальна валідація інтелектуальної локалізації

4.3.1. Дизайн експериментів і метрики оцінювання

Симуляційні сценарії охоплюють стаціонарні й рухомі джерела, різні карти шуму, змінні іоносферні стани, наявність навмисних перешкод. Польові тести проводяться на сітці приймачів із контрольованими тест-передавачами. Базовий набір метрик: просторові похибки (горизонт/висота), довірчі еліпси, час реакції системи, стійкість до «випадіння» постів, чутливість до декореляції годинників, частка правильно класифікованих подій і частота хибних тривог.

Ключовим елементом дослідження в розділі стало використання згорткових нейронних мереж (CNN), здатних обробляти багатовекторні дані амплітудного та кутового аналізу. Навчання нейромережі здійснювалося на синтетичному датасеті, що містив понад 10 000 варіацій координат джерел та параметрів сигналів. Для оптимізації процесу було використано функцію втрат середньоквадратичної похибки (MSE) та алгоритм Adam із початковим коефіцієнтом навчання 0.001.

Окрім нейромережевої обробки, застосовувалися й класичні методи адаптивної фільтрації та згладжування, які забезпечували зменшення впливу шумів і перешкод. Для оцінки точності моделі використовувалися метрики середньої квадратичної похибки та інтегральної області невизначеності, що дозволило отримати кількісні показники ефективності запропонованого підходу.

Експериментальні випробування проводилися у змодельованому середовищі, яке враховувало реальні фактори електромагнітного протиборства, зокрема зниження співвідношення сигнал/шум до 3 дБ, а також дію навмисних перешкод. Отримані результати підтвердили, що запропонований метод забезпечує високу стійкість та придатність до практичного застосування в системах радіомоніторингу та радіоелектронної розвідки, істотно перевищуючи точність класичних підходів.

4.3.2. Результати моделювання та польових випробувань

У процесі моделювання багатопозиційної системи місцевизначення джерел радіовипромінювання реалізовано інтеграцію амплітудного аналізу та пеленгаційної інформації, яка у класичному варіанті використовується для розв'язання задач триангуляції. Основна ідея дослідження полягає у тому, що використання лише однієї характеристики сигналу (амплітуди або напрямку приходу) призводить до значних похибок, особливо у випадках нестабільності іоносфери та дії штучних перешкод. Тому було обрано комбінований підхід, який

дозволяє узгоджено аналізувати дані від кількох приймачів та формувати більш точні координатні оцінки.

Математична модель комбінованого підходу, нехай у багатопозиційній системі є m приймачів, що розташовані у відомих координатах $s_i = (x_i, y_i)i$. Кожен приймач формує пару спостережень:

- амплітуду сигналу A_i ,
- кут приходу θ_i .

Тоді задача оцінки координат джерела $\vec{r} = (x, y)$ формулюється як задача мінімізації узагальненої функції похибки:

$$\hat{\vec{r}} = \arg \min_{\vec{r}} J(\vec{r}), \quad (4.4.)$$

де

$$J(\vec{r}) = \alpha \sum_{i=1}^m \left(A_i - \tilde{A}(\vec{r}, s_i) \right)^2 + \beta \sum_{i=1}^m \left(\theta_i - \tilde{\theta}(\vec{r}, s_i) \right)^2 \quad (4.5)$$

де $\tilde{A}(\vec{r}, s_i)$ та $\tilde{\theta}(\vec{r}, s_i)$ - модельні значення амплітуди та напрямку для точки r , а коефіцієнти α та β задають вагу кожного типу спостережень. Такий підхід дозволяє адаптивно налаштовувати баланс між амплітудною і кутовою складовими залежно від рівня шуму та умов поширення сигналів.

Задача була модифікована шляхом використання згорткової нейронної мережі (CNN), яка апроксимує нелінійне відображення:

$$f: (A_1, \theta_1, \dots, A_m, \theta_m) \mapsto (x, y) \quad (4.6)$$

Для навчання нейромережі використано синтетичний датасет із понад 104 комбінацій координат джерел та відповідних параметрів сигналів. Вхідні дані були

нормалізовані та подані у вигляді матриць спектрально-просторових ознак. Функція втрат визначалася як середньоквадратична похибка:

$$L = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [(x_i - \hat{x}_i)^2 + (y_i - \hat{y}_i)^2] \quad (4.7)$$

де N - кількість прикладів у вибірці, $\vec{r}_i = (x_i, y_i)$ - справжні координати джерела, $\hat{\vec{r}}_i = (\hat{x}_i, \hat{y}_i)$ - прогнозовані координати.

Навчання здійснювалося протягом 100 епох з використанням оптимізатора Adam ($\text{lr} = 0.001$) та розміру батчу 128. У результаті було отримано стале зниження похибки локалізації, що свідчить про ефективність глибокого навчання у задачах багатопозиційної локалізації.

Комп'ютерні експерименти засвідчують стабільне зменшення області невизначеності при комбінуванні амплітудних та кутових ознак із нейромережевою апроксимацією. Польові вимірювання підтверджують збіжність симуляційних висновків: система зберігає працездатність на низьких SNR, коректно реагує на появу «джемінгу», оперативно перелаштовується на альтернативні частотно-просторові рішення. Зафіксовано «м'яке» погіршення при втраті вузлів - без зриву локалізації.

4.3.3. Аналіз похибок, чутливість і обмеження

Головні джерела похибок: фазова нестабільність і опорний шум, похибки синхронізації часу, мультипас і NLOS-умови, неоднозначності при багатьох локальних максимумах функцій відповідності. Чутливісний аналіз показує критичні рубежі деградації (за SNR, рознесенням постів, щільністю мережі). Запропоновано практичні компенсатори: регулярні калібрування, контроль якості

даних на вході, адаптивні пороги детекції, використання пріорів за географією та режимами роботи потенційних джерел.

Проведений експеримент показав, що середня точність локалізації за класичним амплітудним методом становила близько 28.5 км 28.5км, тоді як пеленгаторний метод зменшив похибку до 21.3 км 21.3км. Комбінований підхід без використання нейромереж дозволив досягти точності у 12.8 км 12.8км, а застосування CNN дало середню похибку 6.5 км 6.5км. Таким чином, відносне покращення у порівнянні з базовими методами становить від 55 % до 70 %.

Зменшення області невизначеності можна формально описати через інтегральний показник:

$$\Delta\Omega = \frac{\Omega_{\text{баз}} - \Omega_{\text{CNN}}}{\Omega_{\text{баз}}} \cdot 100\% \quad (4.8)$$

де $\Omega_{\text{баз}}$ - площа області ймовірного розташування джерела за класичними методами, Ω_{CNN} - площа після застосування нейромережевої моделі.

Для нашого випадку $\Delta\Omega \approx 82\%$, що підтверджує значне зростання точності.

Отримані результати свідчать, що поєднання амплітудного та кутового аналізу з нейромережевою обробкою даних є більш стійким до впливу шумів та іоносферних спотворень. В умовах низького співвідношення сигнал/шум (до 3 дБ) система зберігала здатність визначати координати з похибкою менше 10 % від контрольованої області, що робить її придатною для використання в умовах електронної боротьби та мобільного розгортання систем радіомоніторингу.

Таким чином, результати підтверджують наукову та прикладну цінність запропонованого підходу, а також відкривають перспективи його подальшої інтеграції у практичні системи зв'язку та безпеки.

4.4. Системна інтеграція, масштабування та безпека експлуатації

4.4.1. Програмно-апаратна реалізація та часові опори

Програмно-апаратна реалізація багатопозиційної системи локалізації спирається на уніфікований підхід до сенсорних вузлів (SDR-приймачів), мережевої взаємодії, стандартів телеметрії та дисципліни часу. Базовим принципом є взаємозамінність компонентів і «модульність» - від окремого приймального поста до національної мережі[63]. Це дозволяє розгортати систему поетапно, масштабувати її під різні райони відповідальності та забезпечувати життєвий цикл в умовах обмежених ресурсів і переривчастого зв'язку.

Апаратна платформа сенсорів. Як універсальні приймачі застосовуються SDR-пристрої промислового класу з високостабільними опорами частоти (TCXO/OCXO або GPSDO): USRP/N-Series/X-Series, а також середній сегмент (LimeSDR/BladeRF) для мобільних та експедиційних розгортань. Вимоги до фронт-енду: широка смуга приймання, можливість роботи у КХ-діапазоні з узгодженими антенними трактами (включно з активними передпідсилювачами та фільтрами), стійкість до перевантаження сильними позасмуговими сигналами, низький власний шум. Для зменшення міжканальних паразитних складових застосовуються якісні комутатори, смугові фільтри, атенюатори з дистанційним керуванням і періодичне калібрування тракту на тестових маяках.

Обчислювальна архітектура на краю (edge). Кожний пост має вбудований одноплатний або міні-серверний комп'ютер (x86/ARM) з апаратним прискоренням: FPGA у складі SDR для передобробки (декімація, фільтрація, первинне виділення ознак), а також GPU/NPUs для легких моделей на краю. Це знімає трафік і затримки на транспорті - у центр надходять не «сирі» IQ-потoki, а нормалізовані телеметричні серії, спектрограми, кутові та часові оцінки з мітками якості. Перевага такої схеми - автономність: при втраті зв'язку вузол продовжує накопичувати дані

на локальному сховищі (SSD/industrial NVMe), а після відновлення - виконує дозавантаження (store-and-forward).

Програмне забезпечення вузла. На сенсорі працює уніфікований стек: драйвери SDR, блочно-потоківий рушій (GNU Radio/SoapySDR), модулі передобробки (нотіфікація перевантаження, контроль шумової полиці, визначення «тихих» вікон), бібліотека синхронізації часу та «агент телеметрії», який формує стандартизовані повідомлення. Агенти підтримують двонапрямний зв'язок із центром: телеметрія та сповіщення - догори, команди (профілі зйомки, зміна частот, швидкості дискретизації, порогів детекції) - донизу. ПЗ контейнеризоване (Docker/Podman) для швидких оновлень і відновлення після збоїв; конфігурації зберігаються як декларативні профілі (YAML), що полегшує масове розгортання.

Єдиний формат телеметрії та транспорт. Для міжвузлової взаємодії застосовується уніфікована схема повідомлень (наприклад, JSON/CBOR/Protobuf) із чіткими полями: часові мітки, частотні смуги, SNR/SINR, оцінки DoA/TDoA/FoA, індикатори довіри, статус калібрування, температура/напруга вузла, версія ПЗ. Транспорт - надійний і масштабований: MQTT для легкого публікаційно-підписного обміну, або Apache Kafka/Redpanda для високої пропускну здатності й чергування великих потоків. Шифрування - TLS з взаємною автентифікацією, ротація сертифікатів і прив'язка до апаратного сховища ключів (TPM/HSM) на критичних вузлах.

Часові опори та синхронізація. Точність і взаємна узгодженість часу - критичні для TDoA/DoA. Базова дисципліна - GNSS-опора з розведенням 1PPS і 10 MHz до SDR та опорного генератора вузла. Для мережевої синхронізації застосовуються профілі PTP (IEEE 1588v2) з апаратною часовою міткою на NIC і «пласкою» ієрархією grandmaster–boundary–slave; за можливості - White Rabbit/PTP у волоконних сегментах для субмікросекундного вирівнювання. На випадок GNSS-denied сценаріїв передбачено режими «утримання» (holdover) за ОСХО з

температурною компенсацією, перехід на grandmaster у закритому контурі (ePRTC/PRTC-A), а також короткочасні опорні радіомаяки для взаємної калібровки між сусідніми постами. Враховано облік високосних секунд, захист від GPS-spoofing (мульти-GNSS, детектори аномалій, геофенсінг).

Механізми відновлення синфази та калібрування. Передбачено автоматичні процедури: вимір референс-тону (локальний генератор або еталонний зовнішній маяк), контроль шумової полиці на «тихих» частотах, періодичний імпульсний тест для оцінки групових затримок по каналах. Зсуви фази між каналами реєструються як поправки з часовими мітками та застосовуються під час оброблення. Відомі «мертві» ділянки спектра фіксуються в профілях, щоб система не будувала оцінки на заздалегідь неінформативних діапазонах.

Центральна аналітика та сховище. У центрі - кластер мікросервісів для агрегації телеметрії, перетворень, зберігання і візуалізації. «Гарячі» дані - у timeseries БД (InfluxDB/TimescaleDB) для оперативної аналітики; просторові шари (пости, еліпси похибок, карти завод) - у PostgreSQL/PostGIS із геоіндексами. Логи та події - в Elasticsearch/OpenSearch з дашбордами (Kibana/Grafana). Модуль нейроаналітики виконує донавчання за історією, обчислює показники довіри, відстежує дрейф моделей. Інтерфейс оператора - веб-панель з багат шаровою картою РЕО, спектрограмами, треками джерел, журналом тривог і пакетом звітів.

Кіберзахист і контроль доступу. Усі інтерфейси проходять через DMZ і брокери повідомлень з політиками доступу «мінімально необхідних прав» (RBAC/ABAC). Конфігураційні зміни підписуються цифрово, оновлення ПЗ - через захищений репозиторій з перевіркою цілісності (TUF/Notary). Телеметрія маркується мітками довіри; у разі аномалій (нестандартний трафік, часті ребути, відхилення часу) вузол переходить у карантинний режим з локальним логуванням і відсіченням керуючих команд, доки не пройде перевірку.

Надійність, живлення та середовище. Пости розміщуються у вологозахищених і віброусталених корпусах (IP65+), з грозозахистом і запасом тепловідведення. Передбачено два незалежні джерела живлення (мережа + акумулятор/ДБЖ/генератор), моніторинг напруги/температури/струму та керований рестарт. Для віддалених майданчиків - енергоощадні профілі, «нічні» сеанси синхронізації й пакетне дозавантаження даних у години мінімального навантаження каналу. Кабельні тракти - з обов'язковим екрануванням і заземленням; на щоглах - блискавкоприймачі та розрядники на ВЧ/живленні.

Тестування, приймання та супровід. Впроваджено три рівні тестів: (i) модульні - для ПЗ вузлів і аналітики, (ii) інтеграційні - для потоку «сенсор → транспорт → аналітика → візуалізація», (iii) польові - із контрольними маяками та маршрутизованими джерелами. Приймально-здавальні випробування включають перевірку часових опор, калібрування каналів, стрес-тести на пропускну здатність і відмовостійкість (імітація втрати GNSS, падіння сегмента мережі, різкий стрибок навантаження). Експлуатаційний регламент фіксує періодичність калібрувань, ротацію ключів, оновлення контейнерів, контрольні «вікна тиші» для вимірювань і процедури інцидент-респонсу.

Сумісність та інтероперабельність. Формати даних і API відкриті для інтеграції з наявними системами радіомоніторингу/РЕБ і ГІС-платформами. Підтримуються імпорт/експорт у стандартні обмінні формати (наприклад, GeoJSON для просторових шарів, CSV/Parquet для пакетного аналізу), а також шлюзи до зовнішніх каталогів (LDAP/AD) і SIEM-систем для централізованого моніторингу безпеки.

Операційні режими та деградація. Система має профілі: «реальний час» (мінімальна затримка, зменшена глибина моделей), «аналітичний» (розширені моделі, пакетний аналіз), «тримання позиції» (GNSS-denied, локальне накопичення та міжвузлова взаємокалібровка). При деградації каналів зв'язку телеметрія

стискається, а передача IQ тимчасово відключається на користь агрегованих ознак. При втраті одного або кількох постів застосовується перебалансування ваг у модулі злиття, що забезпечує «м'яке» погіршення точності без зриву локалізації.

Сукупно такий проєктний профіль дозволяє одночасно виконати вимоги точності (через жорстку дисципліну часу, калібрування і надійні сенсорні трактати), продуктивності (edge-передобробка, стандартизована телеметрія, горизонтально масштабована аналітика) і стійкості (контейнеризація, резервування, кіберзахист, режими деградації). Це створює реальні умови для стабільної роботи багатопозиційної системи локалізації в складних радіоелектронних та експлуатаційних сценаріях.

4.4.2. Масштабування, відмовостійкість і кіберзахист

Удосконалена архітектура багатопозиційної системи локалізації побудована з урахуванням принципів горизонтального масштабування, високої відмовостійкості та комплексного кіберзахисту. Усі три компоненти взаємопов'язані: можливість динамічного розширення мережі сенсорів без зупинки сервісу потребує гнучкого балансування ресурсів, а стійкість до відмов - дублювання критичних функцій і даних. При цьому забезпечення цілісності, конфіденційності та автентичності потоків інформації є необхідною умовою стабільної роботи в умовах потенційного кібертиску або електронного протиборства.

Масштабування реалізоване на трьох рівнях: сенсорному, мережевому та аналітичному.

На сенсорному рівні кожен SDR-вузол проєктується як автономна одиниця з можливістю додавання до мережі без централізованого перепрограмування. Це досягається завдяки автоматичній реєстрації вузлів у брокері повідомлень, динамічному виділенню ідентифікаторів та обміну метаданими (географічні координати, тип антен, частотні діапазони, SNR-профіль). Завдяки цьому система

може розширюватися географічно - від локального полігону до національної мережі моніторингу.

На мережевому рівні використовується контейнерна оркестрація (Docker Swarm, Kubernetes), що дозволяє балансувати навантаження між вузлами оброблення даних. При збільшенні кількості сенсорів чи обсягу трафіку кластер автоматично масштабує кількість мікросервісів телеметрії, оброблення спектрограм і зберігання результатів. Розподілені черги повідомлень (Kafka, RabbitMQ) забезпечують асинхронну доставку без втрат і гарантують послідовність даних навіть у разі короткочасних розривів зв'язку.

Вертикальне масштабування стосується збільшення обчислювальної потужності центральних вузлів. Для цього застосовуються гібридні конфігурації CPU/GPU із підтримкою розподіленого навчання моделей. Мікросервісна архітектура дозволяє безперервно оновлювати окремі компоненти - наприклад, модулі класифікації сигналів або аналітики - без зупинки всієї системи. У разі збільшення числа джерел даних або підвищення частоти семплювання, інфраструктура може нарощуватись лінійно, без змін у базовому програмному каркасі.

Ключовим аспектом масштабування є топологічна стійкість. Мережа сенсорів реалізує самовідновлювану структуру: при виході з ладу одного з вузлів сусідні приймачі автоматично беруть на себе його просторову зону покриття, компенсуючи втрату через інтерполяцію і вагове коригування у модулі злиття даних. Такий підхід забезпечує «м'яке» деградування якості замість повного зриву локалізації.

Відмовостійкість системи визначається поєднанням структурної надмірності, контрольних механізмів здоров'я вузлів (health monitoring) та автоматизованого резервування.

На рівні сенсорів реалізовано дублювання життєво важливих компонентів - подвійні блоки живлення, паралельні канали Ethernet, резервні GNSS-приймачі та

альтернативні джерела годинникових сигналів. У разі фізичного пошкодження або відключення живлення пост переходить у автономний режим із використанням акумулятора або генератора малої потужності, зберігаючи можливість локального запису даних на проміжний носій.

У комунікаційній інфраструктурі передбачено подвійні транспортні шляхи з автоматичним перемиканням (failover switching) [64,65]. Протоколи передачі підтримують режим повторних спроб і контрольні підписи пакетів. Якщо один сегмент мережі недоступний, телеметрія маршрутизується альтернативними каналами без втрати цілісності.

На прикладі хмарно-орієнтованої конфігурації застосовується стратегія multi-region deployment, коли центральні сервери аналітики дублюються в кількох географічно рознесених дата-центрах. Дані журналів і моделей реплікуються у режимі master-standby з коротким RPO (Recovery Point Objective) < 5 хв та RTO (Recovery Time Objective) < 2 хв.

Моніторинг стану системи здійснюється через централізований health-сервіс, який відстежує затримки, пропускну здатність, температуру, рівень шумів і відхилення часової синхронізації. Виявлення аномалій ініціює сповіщення операторів та, при потребі, автоматичне перезапускання контейнера або перемикання на резервний вузол.

Для підвищення живучості запроваджено принцип graceful degradation - система зберігає базову працездатність навіть при частковій втраті ресурсів: у разі відключення GPU або зниження пропускну здатності каналів вимикаються допоміжні сервіси візуалізації, але продовжується передача критичних параметрів (координати, SNR, спектр).

Важливою складовою є системний аудит відмов. Усі події відстежуються і логуються: час, тип, ступінь впливу, вжиті заходи та час відновлення. Це дозволяє формувати статистику надійності вузлів, прогнозувати ресурси заміни й

оптимізувати логістику запасних частин. На базі таких даних аналітичний модуль формує профіль технічного зносу та оцінює ризики втрати покриття, що дає змогу завчасно планувати превентивні роботи.

Складна топологія системи, розподіленість і наявність бездротових каналів потребують багаторівневого підходу до безпеки. Структура кіберзахисту базується на концепції «defense in depth» - послідовних кілець захисту, які охоплюють фізичний, мережевий, прикладний і аналітичний рівні.

Фізичний рівень - сенсорні вузли обладнуються герметичними корпусами із захистом від несанкціонованого доступу (тампер-датчики, оптичні пломби, сповіщення про відкриття). Доступ до обладнання - лише за двофакторною автентифікацією, а журнал подій зберігається локально та в центрі.

Мережевий рівень - уся телеметрія передається у зашифрованому вигляді (TLS 1.3, AES-256 GCM), із взаємною автентифікацією сертифікатів та ротацією ключів. Для критичних сегментів застосовується розділення VLAN і міжмережеві екрани нового покоління (NGFW) із політиками контролю трафіку.

Захист від атак типу DoS/Replay забезпечується перевіркою часових позначок, обмеженням частоти запитів і механізмами rate-limiting.

Передбачено резервний офлайн-канал із шифруванням на апаратному рівні (VPN IPsec) для обміну між штабними вузлами у випадку втрати основної комунікації.

Прикладний рівень - усі сервіси функціонують у контейнерах із обмеженими привілеями (sandbox). Кожен модуль має власну роль і політику доступу (RBAC/ABAC), що мінімізує потенційну шкоду у випадку компрометації. Контейнери перевіряються на вразливості (CVE-сканування), оновлення відбуваються під цифровими підписами, що виключає підміну ПЗ.

Для нейромережових моделей передбачено контроль версій і хешування контрольних точок (checkpoint hash), щоб запобігти несанкціонованим модифікаціям алгоритмів.

Аналітичний рівень - система безпеки включає підсистему SIEM (Security Information and Event Management), що агрегує журнали з усіх вузлів, аналізує події у режимі реального часу та корелює підозрілі дії.

Реалізовано модуль виявлення аномалій поведінки (ML-IDS), який вивчає профіль трафіку й виявляє нетипові сигнатури, наприклад, раптове збільшення обсягу переданих даних чи зміну часових патернів синхронізації. У випадку фіксації загрози система автоматично ізолює вузол у «карантинну» підмережу, повідомляє операторів і зберігає дамп пам'яті для подальшого аналізу інциденту.

Управління ключами та довірчою інфраструктурою. Централізований PKI-сервер генерує, розповсюджує і відкликає сертифікати для всіх компонентів. Ключі зберігаються у захищених апаратних модулях TPM 2.0 або HSM. Оновлення та ротація ключів виконуються автоматично за регламентом, що гарантує сталість ланцюга довіри.

Для підтримки безперервного рівня безпеки функціонує система контролю конфігурацій (Compliance Monitoring) [66], яка перевіряє вузли на відповідність політикам: актуальність ПЗ, рівень оновлень безпеки, стан антивірусного захисту, наявність дозволених портів. Виявлені невідповідності фіксуються у звітах і передаються адміністраторам для усунення.

Крім технічних заходів, реалізовано організаційно-процедурні аспекти: багаторівнева система доступу користувачів, обов'язкове логування дій, навчання персоналу правилам інформаційної гігієни, періодичні аудити та перевірки відповідно до стандартів ISO/IEC 27001, 27035 та NIST SP 800-53.

Передбачено створення резервної команди реагування на інциденти (CERT) з регламентом дій, який охоплює виявлення, локалізацію, нейтралізацію і післяінцидентний аналіз.

Таким чином, у системі реалізовано повний цикл забезпечення надійності: від масштабування ресурсів і відмовостійкого функціонування до комплексного кіберзахисту. Усі механізми інтегровані у спільну архітектуру управління, що дозволяє підтримувати стійкість навіть у критичних умовах - при кібератаках, перебоях електроживлення чи фізичному ураженні окремих елементів мережі.

Такий рівень організації гарантує безперервність моніторингу радіоелектронного простору, збереження достовірності даних і контроль над інформаційною безпекою на всіх етапах життєвого циклу системи.

4.4.3. Оцінка ефективності, регламент і дорожня карта впровадження

Оцінка ефективності запропонованої багатопозиційної системи локалізації є ключовим етапом, що дозволяє не лише кількісно визначити рівень її технічних характеристик, а й підтвердити її експлуатаційну та аналітичну спроможність у реальних умовах. У процесі дослідження розроблено трикомпонентну систему оцінювання - технічну, операційну та аналітичну, яка охоплює повний життєвий цикл функціонування: від моменту реєстрації сигналів до прийняття рішень на командно-штабному рівні.

Технічна ефективність

Технічна складова визначається показниками точності, швидкодії, живучості та стабільності системи в умовах активного радіоелектронного впливу.

Точність визначення координат джерел випромінювання оцінюється на основі статистичних метрик: середньоквадратичної похибки, площі еліпсів невизначеності та інтегрального показника $\Delta\Omega$. Вимірювання проводяться при різних рівнях SNR, від +20 до 0 дБ, що дозволяє моделювати як звичайні, так і кризові сценарії.

Швидкодія системи - це час між моментом фіксації сигналу на сенсорі й формуванням координатної оцінки у центрі оброблення. Завдяки розподіленій обробці та edge-аналітиці середній час реакції становить не більше 3 секунд при обсязі мережі до 100 постів.

Живучість і відмовостійкість оцінюються за показниками MTBF (Mean Time Between Failures) і коефіцієнтом функціональної готовності. Тестові випробування засвідчили, що при втраті до 20 % сенсорів точність локалізації знижується не більш ніж на 10 %, що підтверджує ефективність реалізованих механізмів «м'якої деградації».

Стійкість до активних перешкод перевірялась у змодельованому середовищі електронної боротьби: система зберігала працездатність при заглушенні до 30 % діапазону та витримувала атаки типу джемінг з піковою потужністю до +40 дБм.

Отримані результати дають підстави вважати систему придатною для використання у критичних умовах, коли традиційні засоби пеленгації втрачають точність або синхронізацію.

Операційна ефективність

Операційна площа оцінки охоплює економічні, енергетичні та організаційні аспекти експлуатації.

Енергоспоживання визначалося як функція кількості активних каналів і режимів обробки (реальний час / пакетний). Для стаціонарних постів середнє споживання становить 180–250 Вт, для мобільних - не перевищує 90 Вт. Це забезпечує автономну роботу від акумуляторних систем упродовж 10–12 годин.

Витрати на обслуговування мінімізуються завдяки уніфікації апаратних і програмних компонентів: стандартизовані SDR-модулі, контейнеризоване ПЗ, централізовані оновлення та діагностика. Це знижує потребу у виїзних технічних бригадах і дозволяє віддалено проводити більшість процедур контролю.

Експлуатаційна зручність і автоматизація - завдяки розвиненому інтерфейсу оператора, який містить багат шарову інтерактивну карту, системи сповіщення та сценарії реагування. Програмні агенти здійснюють самоконтроль і самокалібрування, що скорочує людський фактор і час на відновлення працездатності.

Ключовим показником операційної ефективності є індекс операційної готовності (Operational Readiness Index), що враховує відсоток часу безперервної роботи, кількість успішно виконаних завдань і кількість автоматичних перезапусків без втрати даних. Для розробленої системи цей індекс становить понад 0,94, що свідчить про високий рівень зрілості рішень і здатність до тривалого функціонування без ручного втручання.

Аналітична ефективність і якість ситуаційної обізнаності

Третя площина - аналітична ефективність - визначає, наскільки система підвищує якість прийняття рішень у командно-штабних структурах.

Висока роздільність даних дозволяє створювати динамічні карти радіоелектронної обстановки (РЕО) з оновленням у реальному часі, що забезпечує оперативне виявлення джерел випромінювання, зон активності РЕБ, спектральних «дірок» і потенційних вікон зв'язку.

Інтеграція з іншими системами ситуаційного моніторингу (ГІС, радіотехнічна розвідка, інформаційна безпека) формує єдиний інформаційний простір, у якому дані з радіочастотного сегмента доповнюють відомості з оптичних, радарних та кібераналітичних каналів.

Аналітичні звіти й автоматизована оцінка тенденцій дозволяють відстежувати динаміку радіочастотного навантаження, прогнозувати появу нових джерел та імовірність міжсистемних конфліктів. Таким чином, система перетворюється з інструменту спостереження на інструмент прогнозного управління спектром.

Якість ситуаційної обізнаності оцінюється через коефіцієнт достовірності карт РЕО, час оновлення даних та кількість підтверджених спостережень. Експерименти засвідчили, що завдяки гібридним алгоритмам об'єднання даних (fusion) рівень достовірності перевищує 97 %, а час оновлення інтерактивної карти - менше 5 секунд.

Регламент експлуатації. З метою забезпечення стабільної роботи системи розроблено регламент експлуатації, який охоплює технічні, програмні й організаційні процедури:

Періодичність калібрувань. Для сенсорів визначено цикл технічного обслуговування - не рідше ніж раз на 90 днів або після зміни кліматичних умов експлуатації. Передбачено дистанційне калібрування через стандартний еталонний сигнал.

Оновлення моделей і баз даних. Алгоритми нейромереж та фільтрів проходять ревізію кожні пів року або після виявлення значних зсувів у характеристиках спектра. Оновлення здійснюється централізовано з контрольованого репозиторію.

Контрольні сценарії “стрес-тестів”. Щоквартально проводяться тести на пропускну здатність, відмовостійкість, перевірку резервних каналів і поведінку при екстремальних рівнях шумів.

Журналювання й звітність. Кожен вузол формує добові журнали стану, а система централізовано створює зведені звіти для технічного персоналу та штабних рівнів управління. Формати звітів уніфіковані для подальшої інтеграції з існуючими інформаційно-аналітичними платформами.

Такі стандартизовані процедури створюють основу для сертифікації та введення системи у дослідну або промислову експлуатацію згідно з вимогами ІТГП НАН України.

Дорожня карта впровадження. Для практичної реалізації системи розроблено дорожню карту впровадження, що передбачає поетапне нарощування функціональності, масштабів і рівнів інтеграції:

Пілотна фаза (2025–2026 рр.) - розгортання у тестових зонах, зокрема на полігонах ІТГІП НАН України та у прифронтових регіонах, де ведеться активний радіомоніторинг. Мета - верифікація точності, відпрацювання протоколів телеметрії, відлагодження взаємодії сенсорів і командного центру.

Етап регіональної експлуатації (2026–2027 рр.) - розширення мережі до рівня обласних центрів, інтеграція з системами радіоелектронної боротьби (РЕБ), державними системами зв'язку, інформаційними платформами безпеки. Забезпечення обміну даними через захищені шлюзи.

Етап національного розгортання (2027–2029 рр.) - формування інтегрованої архітектури з єдиним центром ситуаційної обізнаності. Розробка стандартів взаємодії з суміжними структурами - ДСНС, Держспецзв'язку, Міноборони, Національною поліцією.

Інтероперабельність і міжнародна кооперація (після 2030 р.) - розширення сумісності з міжнародними системами радіомоніторингу, включно з можливістю обміну спектральними даними з партнерами НАТО/ЄС у рамках програм цивільної оборони та захисту критичної інфраструктури.

У кожній фазі дорожньої карти передбачено цикл оцінювання ефективності, зворотного зв'язку й корекції плану. Це дозволяє поступово підвищувати рівень автоматизації, точності та аналітичної глибини, водночас мінімізуючи ризики технічних або організаційних збоїв.

Висновки до розділу 4

Четвертий розділ присвячено реалізації, експериментальній перевірці та впровадженню розробленої інформаційної технології моніторингу радіочастотного простору. Запропонована багатопозиційна інтелектуальна система локалізації усуває ключові обмеження класичних підходів у короткохвильовому (КХ) діапазоні, поєднуючи розподілені SDR-вимірювання, нейромережеве виділення ознак і адаптивне злиття даних.

Розроблена архітектура передбачає використання GNSS-орієнтації, єдиного часу (1PPS/10 MHz), протоколів RTP/NTP для синхронізації та модулів самодіагностики, що забезпечують контроль фазових зсувів і стабільність вимірювань. Система характеризується високою живучістю, стійкістю до мультипасу, іоносферних збурень і навмисних перешкод, а також здатністю до «м'якого» деградування при відмовах окремих вузлів.

Проведено оцінку ефективності, яка показала підвищення точності локалізації джерел випромінювання на 25–30 %, скорочення часу реакції системи на 20 % та зростання достовірності розпізнавання сигналів до 0,9. Розроблено регламент експлуатації системи, політики оновлення моделей і сценарії «стрес-тестів», що забезпечують відповідність стандартам інформаційної безпеки та кіберзахисту.

Створено дорожню карту впровадження розробки, яка передбачає етапне розгортання в критичних регіонах, інтеграцію з національною системою спектрального контролю та з підрозділами РЕБ, а також подальше масштабування на міжвідомчому рівні.

Таким чином, запропонована технологія формує цілісне рішення для підвищення ефективності управління частотним ресурсом і зміцнення інформаційної безпеки України в умовах збройної агресії та повоєнного відновлення.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальне наукове завдання - розроблено інформаційну технологію моніторингу радіочастотного простору в умовах військових дій, яка забезпечує підвищення точності, швидкодії та стійкості систем радіомоніторингу за рахунок використання методів когнітивного аналізу, машинного навчання та програмно-визначуваних радіосистем (SDR).

Розроблена технологія дозволяє адаптивно управляти динамічним розподілом частотного ресурсу, ефективно виявляти та класифікувати джерела радіовипромінювання навіть за умов низького співвідношення сигнал/шум та активної радіоелектронної протидії.

Отримані результати мають як наукову новизну, так і практичне значення для підвищення ефективності систем зв'язку, радіорозвідки та контролю ефірного простору України.

У процесі дослідження отримано такі основні наукові та практичні результати:

1. Розроблено інтегровану математичну модель управління динамічним розподілом частотного ресурсу, яка поєднує елементи когнітивного радіо, теорію ігор, адаптивне керування та алгоритми машинного навчання. Запропонована модель є універсальною основою для побудови інтелектуальних систем зв'язку нового покоління, здатних до самонавчання та самоналаштування під час радіоелектронної протидії.

2. Створено програмно-алгоритмічний модуль аналізу та класифікації сигналів, що реалізує навчання згорткових нейронних мереж (CNN) на синтетичних даних із різними параметрами шуму, частотного маневрування та амплітудної модуляції. Модуль забезпечує точність розпізнавання понад 95 % у діапазоні частот 30 МГц–6 ГГц, що підтверджено експериментальними результатами.

3. Розроблено алгоритмічний комплекс інтелектуального аналізу сигналів, який забезпечує багаторівневу обробку інформації (виявлення, класифікація, локалізація) та стійке функціонування за низьких значень SNR (до 3 дБ). Удосконалено підхід до злиття даних (fusion) на основі адаптивного фільтра Калмана та нейронних мереж, що дозволило зменшити похибку локалізації на 60–70 %.

4. Удосконалено методику динамічного управління частотним ресурсом із використанням Q-навчання та функції корисності, яка враховує пропускну здатність, енергоспоживання, стійкість та швидкодію системи. Запропонована методика забезпечує оптимальний розподіл спектра між користувачами в реальному часі та дозволяє підвищити ефективність використання частотного ресурсу в умовах бойових дій.

5. Створено симуляційну SDR-модель системи управління спектром у середовищах GNU Radio та MATLAB. Модель відтворює реальні умови радіоелектронного середовища, дозволяє перевіряти алгоритми в умовах перешкод, перевантаження спектра та багатоканальних випромінювань. Проведено порівняльну оцінку точності, швидкодії та енергоспоживання системи, що підтвердило її ефективність.

6. Розроблено практичну архітектуру та регламент впровадження інформаційної технології моніторингу радіочастотного простору, що включає вимоги до синхронізації, кіберзахисту, масштабування та експлуатаційного обслуговування. Запропоновано дорожню карту інтеграції системи у структури Збройних Сил, наукові та навчальні заклади..

7. Проведено апробацію запропонованих алгоритмів на експериментальних SDR-платформах з GNSS-синхронізацією. Отримано підтвердження стабільності та живучості системи в умовах активних перешкод: середня похибка локалізації не

перевищує 10 %, час реакції зменшено на 25 %, а рівень достовірності розпізнавання сигналів збільшено до 0,9.

8. Практична реалізація результатів дисертації дозволяє підвищити ефективність моніторингу радіочастотного простору, забезпечити безперервний контроль ефірного середовища та інформаційну стійкість у критичних умовах. Отримані наукові й інженерні рішення можуть бути використані під час модернізації систем радіомоніторингу Збройних Сил України, а також у державних програмах з управління спектром та післявоєнного відновлення інфраструктури зв'язку.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Зайцев, С.В., Василенко, В.М., Триснюк, Т.В. та Сокоринська, Н.В. (2023). Метод адаптації каскадних кодів для забезпечення надійності передачі інформації бездротових систем передачі даних. Екологічна безпека та природні ресурси ,47 (3), 133–143. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.3.133-143>;
2. Сигналов Ю.І. Теорія та практика РЕР: навч. посібник. - Харків: ХНУРЕ, 2020. - 168 с. - С. 85–88.
3. Куцик П. О., Миськів Б. Б. Застосування нечіткої логіки у задачах прийняття рішень в умовах невизначеності // Вісник НТУУ "КПІ". Серія: Інформатика та управління - 2020. - №1. - С. 45–51.
4. . Тимошенко В. А. Нечіткі системи та штучний інтелект: навч. посібник. – Київ: Наукова думка, 2018. – 320 с.
5. Richharia M., Westbrook L. Satellite Communications Systems: Design Principles. – Hoboken: Wiley, 2019. – 648 p.
6. Doyle, J., & Akin, D. (2022). Decision Support Systems for Satellite Operations. MIT Press. - 412 p.
7. Sklar, B. (2017). Digital Communications: Fundamentals and Applications (2nd ed.).Prentice Hall. - 1104 p
8. Wertz J.R., Larson W.J. Space Mission Engineering: The New SMAD. – Hawthorne: Microcosm Press, 2019. – 1042 p.
9. Stallings, W. (2020). Wireless Communications and Networks (2nd ed.).Pearson Education. - 656 p.
10. Haass, R. The World: A Brief Introduction. New York: Penguin Press, 2020. - 400 с.

11. Бойко А.І., Винокуров С.В. Супутниковий зв'язок: теорія та практика. - К.: ДУТ, 2020. 248 с.
12. Загора О.В., Фещенко А.Б., Борисова Л.В., Собина В.О., Тарадуда Д.В., Демент М.О., Неклонський І.М. Національний університет цивільного захисту України, 2021 – 288с.
13. Gilli, A. & Gilli, M. (). AI, Autonomous Systems and the Future of Warfare. European Union Institute for Security Studies (EUISS), 2021 - 234 с.
14. Ковальчук О.В. Аналіз ефективності використання частотних ресурсів у супутникових системах зв'язку. // Радіотехніка. – 2016. – №187. – С. 45–52.
15. Гаврилюк А.С. Системи технічної розвідки в сучасному бою. - Збірник наукових праць НУОУ, 2022.
16. Maral G., Bousquet M. Satellite Communications Systems: Systems, Techniques and Technology. – Hoboken: Wiley, 2017. – 880 p.
17. NATO STANAG 4635. Standardization Agreement for Satellite Spectrum Monitoring and Reporting. Brussels: NATO Standardization Office, 2023. 52 p.
18. Baines, J., Smith, R. Modern Tactical SIGINT for Satellite Communications. - NATO Communications Journal, 2023.
19. Ніколаєнко Б.А., Пелешок Є.В. Сучасні супутникові системи зв'язку: навчальний посібник. – Київ: Інститут спеціального зв'язку та захисту інформації КІІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 152 с.
20. Петренко І.М. Особливості радіомоніторингу супутникових систем зв'язку в Х-діапазоні частот. // Збірник наукових праць Центрального науково-дослідного інституту навігації і управління. – 2019. – №4(60). – С. 67–73.
21. Триснюк В.М., Дзюба В.А., Тимчук В.Ю. Інформаційно-технічне моделювання ліквідації наслідків військових дій та техногенних катастроф на території України. Екологічна безпека та природокористування, Вип. 1 (49), 2024 р., с. 143-155. ISSN: 2411-4049. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2024.1.143-155>

22. Борисов І.В., Рурський Т.Г., Ніщенко В.І., Хоменко П.В., Цімура Ю.В. Сучасні військові засоби радіо та супутникового зв'язку. Київ: Видавничий дім «Сварог», 2023 - 430 с.
23. Триснюк, В., Дзюба, В. (2025). Інформаційна технологія динамічного управління частотним ресурсом у складній радіоелектронній обстановці. *Електронне фахове наукове видання «Кібербезпека: освіта, наука, техніка»*, 2(30), 607–615. <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2025.30.999>
24. Мельник В.П. Методи підвищення завадостійкості супутникових каналів зв'язку в діапазонах С та Ku. // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". – 2018. – №895. – С. 102–108.
25. Триснюк В.М., Конецька О.О., Волинець Т.В. Сметанін К.В., Дзюба В.А. Особливості класифікації джерел небезпеки, що призводять до надзвичайних ситуацій воєнного характеру. Інформаційно-комунікаційні технології та сталий розвиток. Колективна монографія за матеріалами XXI Міжнародної науково-практичної конференції. Київ, 14-16 листопада 2022 р. За заг. ред. С.О. Довгого. – К.: ТОВ «Видавництво. «Юстон», 2022. – с. 143-145. https://itgip.org/wp-content/uploads/2022/12/2022-12-06_UDK_book_Monografia_48x210.pdf
26. Жураковський Б.Ю., Зенів І.О. Комп'ютерні мережі. Частина 1: навчальний посібник. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 336 с.
27. Гарасим О.І. Концептуальні моделі захисту інформації для технологій стаціонарного, стільникового та супутникового зв'язку // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". – 2021. – № 2(110). – С. 87–98.
28. Турбан Е.Ф. Системи підтримки прийняття рішень і інтелектуальні системи. – Львів: Сполом, 2017.– 450 с.
29. Тарнавський Ю.А., Кузьменко І.М. Організація комп'ютерних мереж: навчальний посібник. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 312 с.

30. Mukhin V., Kornaga Ya., Zavgorodnii V., Zavgorodnya A., Krylov E., Rybalochka A., Kornaga V., Belous R. Devising A Method To Identify An Incoming Object Based On The Combination Of Unified Information Spaces. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(2-111), 2021. P. 35 – 44. (SCOPUS);

31. Триснюк Т.В., Дзюба В.А. Методика управління динамічним розподілом частотного ресурсу в умовах радіоелектронної боротьби із використанням sdr технологій. *Телекомунікаційні та інформаційні технології*. 2025. № 3 (88). С. 150-156. ISSN 2412-4338. <https://tit.dut.edu.ua/index.php/telecommunication/article/view/2645/2517>
<https://doi.org/10.31673/2412-4338.2025.038717>

32. Зорін К.М., Дзюба В.А. Науковий та освітній виміри, як умови сталого розвитку суспільства. *Інформаційно-комунікаційні технології та сталий розвиток*. Колективна монографія за матеріалами XXI Міжнародної науково-практичної конференції. Київ, 14-16 листопада 2022 р. За заг. ред. С.О. Довгого. – К.: ТОВ «Видавництво. «Юстон», 2022. – с. 230-232.

33. Kupchan, C. *Isolationism: A History of America's Efforts to Shield Itself from the World*. New York: Oxford University Press, 2020. - 464 с.

34. Триснюк, В., Дзюба В. (2025). Інтелектуальні методи багатопозиційної локалізації джерел радіосигналів з використанням нейронних мереж та адаптивних фільтрів. *Кібербезпека: освіта, наука, техніка*, 1(29), 452–463.

Електронне фахове наукове видання <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2025.29.899>

35. Довженко, Н., Складанний, П., Іваніченко, Є., Жильцов, О. (2025). Модель динамічної взаємодії безпілотних літальних апаратів із сенсорною мережею для енергоефективного моніторингу. *Електронне фахове наукове видання «Кібербезпека: освіта, наука, техніка»*, 3(27), 466–478. <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2025.27.766>

36. Polishchuk M., Tkach M., Zhuchenko O., Kornaga Y. Mobile Robot for Monitoring Park Trees: Design and Modeling. *FME Transactions*, V. 51, Issue 3, 2023. P. 423 - 431. (SCOPUS) DOI: 10.5937/fme2303423P;

37. Сидоренко Л.Г., Ткаченко О.В. Аналіз загроз безпеці інформації в супутникових системах зв'язку та методи їх нейтралізації. // Інформаційна безпека та інформаційні технології. – 2020. – №2(28). – С. 35–42.

38. Берлянд, В. Л. Методи математичної оптимізації. - Київ: Наукова думка, 1982. - 310 с.

39. Нагорний Є.І., Дзюба В.А. Приступа В.В. Створення підсистеми консолідованої обробки інформації при вогневому ураженні Математичне моделювання та інформаційно-комунікаційні технології для зміцнення та відновлення // Колективна монографія за матеріалами XXIII Міжнародної науково-практичної конференції (Київ, 12-13 листопада 2024 р.) / За заг. ред. С.О. Довгого. – К.: ТОВ «Видавництво «Юстон», 2024. – с. 64-65 SBN 978-617-8335-33-5 DOI: 10.37321 [2024-11-24_zbirka_all_07_11_2024_148x210](#)

40.Триснюк Т.В., Тимчук В.Ю., Волинець Т.В., Дзюба В.А. Відновлювальні заходи наслідків військових дій та техногенних катастроф на території України. Актуальні проблеми та інноваційні технології у сфері гуманітарного розмінування, цивільного захисту, критичної інфраструктури та екологічної безпеки для повоєнного відновлення України: Збірник наукових праць Міжнародної науково-практичної конференції: НУХТ, 6 – 7 листопада 2024. С.80 – 90. ISBN 978-966-612-349-0

41. Лаврут О., Лаврут Т., Климович О., Здоренко Ю. Новітні технології та засоби зв'язку у ЗСУ: шлях трансформації та перспективи розвитку. – Ukrainian Military Pages, 2019.

42. Іванов Д.А., Олійник Р.М., Живець Ю.М., Іванова В.А. Розвідувально-ударні системи в мережево-центричній війні. – Наукові праці ДНДІ ВС ОВТ, 2024, вип. 1(19).

43. Капінос В. В., Попович В. І. Нечітка логіка як інструмент для побудови гібридних експертних систем // Системи обробки інформації (ХАІ) - 2019. - Вип. 4(155). - С. 92–98.

44. Improvement Of The System Of Automated Pointing Of The Antenna To The Satellite. V. Ehorov, T. Trysnyuk, V. Prystupa, Ye. Nahornyj, V. Marushchak European Association of Geoscientists&Engineers 16th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment, Nov 2022, Volume 2022, p.1 – 5.

45. Russell S., Norvig P. Artificial Intelligence: A Modern Approach. 3-rd ed. – Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2010. – 1152 p.

46. Ковбасюк С. В. Метод найменших квадратів та його практичне застосування: монографія / С. В. Ковбасюк, О. О. Писарчук, М. Ю. Ракушев. – Житомир : ЖВІ НАУ, 2008. – 228 с.

47. Bertsekas, D. P. (2017). Dynamic Programming and Optimal Control (4th Edition). Athena Scientific. - Vol. 1: 576 p.

48. Hillier, F. S., & Lieberman, G. J. (2021). Introduction to Operations Research (11th Edition). McGraw-Hill Education. - 1216 p.

49. В.О. Шумейко, Т.В. Триснюк, Т.В. Волинець, В. М. Марущак, В. А. Дзюба. Інформаційне забезпечення систем екологічного моніторингу транскордонних впливів. «ІХ Міжнародний з'їзд екологів». Вінниця, 25-27 вересня 2024 р. с.265-267.

<https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/ecology/ecology2024/paper/viewFile/22214/18372>

50. Данилюк М. І. Інформаційні технології в управлінні. - Львів: Новий Світ, 2020. - 368 с.

51. Триснюк Т.В., Конецька О.О., Нагорний Є.І., Приступа В.В., Дзюба В.А., Василенко В.М. Комплексне застосування ГІС - технологій для моніторингу

пошкоджених об'єктів критичної інфраструктури. 22 Міжнародна науково-практична конференція «Інформаційно-комунікаційні технології для перемоги та відновлення». Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України м. Київ 14-15 листопада 2023 р. с. 117-120. https://itgip.org/wp-content/uploads/2023/11/1_zbirka_08_11_23-1-1.pdf

52. Ушенко Ю.О., Негрич А.Л., Галочкін О.В. Глобальна інформаційна інфраструктура інфокомунікаційних мереж та систем: навчальний посібник. – Чернівці: Чернівецький національний університет ім. Ю. Федьковича, 2021. – 224 с.

53. Триснюк Т., Молодецький Б., Мосійчук Д., Дзюба В., Фадеїчев В. Системи радіомоніторингу для забезпечення екологічної безпеки та контролю ефірного простору Матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції «Green Construction» («Зелене будівництво»). Київ, 13-14 травня 2025 року Київський національний університет будівництва і архітектури. с. 305-307

<https://www.researchgate.net/publication/391850615>

54. Platonenko, A., Sokolov, V. ., Skladannyi, P., & Oleksiienko, H. (2021). Technical Means of Airintelligence to Ensure the Physical Security of Information Activities. Electronic Professional Scientific Journal «Cybersecurity: Education, Science, Technique», 4(12), 143–150. <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2021.12.143150>;

55. Сокоринська, Н., Постернак, Ю. ., Зайцева, Л. ., & Руденок, О. (2023). Метод адаптивного вибору розміру діаграм станів турбокодів у системах 5G та IoT. Технічні науки та технології, (2 (32), 249–260. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-2\(32\)-249-260](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-2(32)-249-260)

56. Vasyl Trysnyuk, Volodymyr Yehorov, Serhii Tymchuk, Taras Trysnyuk. Geo-information system for ensuring the functioning of the VHF range radio direction finding network. ITTAP 2022. Information Technologies: Theoretical and Applied Problems

2022. Proceedings of the 2nd International Workshop on Information Technologies: Theoretical and Applied Problems (ITTAP 2022). P. 117-123. Ternopil, Ukraine, November 22-24, 2022.

57. Триснюк В. М., Дзюба В. А., Молодецький Б. В., Актуальність створення інформаційної системи радіомоніторингу УКХ-діапазону з використанням ГІС-технологій Міжнародна наукова конференція_«Сучасний стан та перспективи розвитку систем і засобів спеціального призначення, підвищення якості підготовки фахівців високотехнологічних спеціальностей з урахуванням досвіду широкомасштабної збройної агресії РФ проти України» Житомирський військовий інститут імені С. П. Корольова 30 травня 2025 року с. 68-70

58. Ліпатов А. О. Основи супутникових телекомунікаційних систем : навч. посіб. / А. О. Ліпатов, М. О. Могильченко, М. О. Коломицев ; під ред. А.О. Ліпатова. – К. : ВІТІ НТУУ «КПІ», 2004. – 220 с.

59. Haykin, S. Cognitive Radio: Brain-Empowered Wireless Communications. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2005, Vol. 23, No. 2, pp. 201–220. DOI: 10.1109/JSAC.2004.839380;

60. Brands, H. & Beckley, M. Danger Zone: The Coming Conflict with China. New York: W.W. Norton & Company, 2022 - 280 с.

61. Ставісюк Р.Л., Єгоров В.О., Гайка Ю.А., Гончаров Д.О. Проблемні питання побудови захищених комп'ютерних мереж для забезпечення захисту інформації в спеціальних мережах підрозділів Збройних Сил України.

62. Дзюба В.А. Зорін К., Шумейко В.О. Взаємозв'язок інформаційних технологій та суспільства під час війни: політикоправовий аспект. Матеріали XXVIII-ої Міжнародної науково-практичної конференції (07 січня 2023 року, Лімасол (Кіпр), дистанційно). Сучасні аспекти модернізації науки: стан, проблеми, тенденції розвитку. с. 336-342

<https://dspace.uzhnu.edu.ua/jspui/bitstream/lib/48475/1/%D0%97%D0%B1%D1%96%D1%80%D0%BD%D0%B8%D0%BA%2C%20%D0%BA%D0%BE%D0%BD%D1%84%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%BD%D1%86%D1%96%D1%8F%20%281%29.pdf>

63. Ковбасюк С. В. Теоретичні основи автоматизації процесів вироблення рішень у системах управління: навч. посіб. / С. В. Ковбасюк, О. О. Писарчук. – Житомир : ЖВІРЕ, 2006. – 132 с.

64. Єгоров В. Система автоматизованого програмного управління антенною системою супутникового радіомоніторингу. Екологічна безпека та природокористування//Збірник наукових праць: вип. 4 (52), 99–105. 2024.

65. Шевченко В. С., Розум С. І. Системи підтримки прийняття рішень. - Київ: Видавництво «Центр учбової літератури», 2022. - 320 с.

66. Лозовський С. І., Іванюк Г. І. Автоматизовані системи управління: методологія створення та функціонування. - Київ: НАУ, 2021. - 312 с.

ДОДАТКИ

Додаток А Військова частина А2667

ЗАТВЕРДЖУЮ

Командир військової частини А2667

генерал-майор

Сергій ДВОРЕЦЬКИЙ

2025 р.



АКТ

впровадження наукових результатів дисертації
аспіранта Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору
Національної академії наук України
ДЗЮБИ Володимира Андрійовича

Комісія військової частини А2667 у складі:

голови комісії — полковника МАГАСЯ Володимира Степановича

та членів комісії: полковника ОНИЩЕНКА Олега Васильовича, кандидата технічних наук полковника ГОДЛЕВСЬКОГО Сергія Миколайовича та майора ОЛІЙНИКА Павла Олександровича розглянула запропоновані матеріали в межах дисертаційного дослідження аспіранта ДЗЮБИ Володимира Андрійовича на тему “Інформаційна технологія моніторингу мереж радіозв’язку”.

Комісією підтверджено, що реалізація поставленого наукового завдання сприяє суттєвому підвищенню достовірності результатів спостереження та значному розширенню функціональних можливостей інформаційних технологій моніторингу мереж радіозв’язку. Це досягається завдяки вирішенню наукового завдання з розроблення інформаційної технології моніторингу мереж радіозв’язку із застосуванням нейромереж та технологій штучного інтелекту, сучасних підходів до аналізу та синтезу структурних, інформаційних і функціональних моделей джерел радіовипромінювання і процесів які в них відбуваються. Це дозволило збільшити рівень автоматизації процесів в ході аналізу, як наслідок покращити якість аналізу, зменшити час прийняття рішень.

Комісією встановлено, що особливу увагу приділено розвитку програмно-визначених радіосистем (SDR) яке використовує програмне забезпечення замість звичайного обладнання для виконання функцій обробки радіосигналів, зокрема за допомогою нейронних мереж та штучного інтелекту.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що впровадження розроблених в дисертаційному дослідженні елементів інформаційних технологій дозволяє забезпечити науково обгрунтоване управління розподілом радіочастотного спектру в режимі реального часу та значно підвищити ефективність його використання. Обгрунтовано необхідність створення та впровадження такої технології для використання у моніторингу всіх видів зв'язку, які використовуються в Україні.

Таким чином результати дисертаційного дослідження можуть бути реалізовані в ході бойової роботи військової частини А2667 під час виконання поставлених завдань.

Голова комісії: полковник

Члени комісії: полковник

полковник

майор

Володимир МАГАСЬ

Олег ОНИЩЕНКО

Сергій ГОДЛЕВСЬКИЙ

Павло ОЛІЙНИК

Додаток Б

Державний університет телекомунікацій

ЗАТВЕРДЖУЮ



Директор навчально-
наукового інституту
інформаційних технологій
Катерина НЕСТЕРЕНКО

Нестеренко
"___" _____ 2025 р.

АКТ

впровадження наукових результатів дисертації
аспіранта Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору
Національної академії наук України
ДЗЮБИ Володимира Андрійовича

Комісія у складі голови комісії – д.т.н., професора, завідувача кафедри Технологій цифрового розвитку Жебки Вікторії Вікторівни та членів комісії: к.т.н. Аронова Андрія Олексійовича, доктора філософії Герцюка Миколи Модестовича розглянула запропоновані матеріали в межах дисертаційного дослідження аспіранта Дзюби Володимира Андрійовича на тему «Інформаційна технологія моніторингу мереж радіозв'язку».

Комісією підтверджено, що реалізація поставленого наукового завдання сприяє суттєвому підвищенню достовірності результатів спостереження та значному розширенню функціональних можливостей інформаційних технологій моніторингу мереж радіозв'язку. Це досягається завдяки вирішенню наукового завдання з розроблення науково обґрунтованої інформаційної технології моніторингу радіочастотного простору (мереж радіозв'язку) в умовах радіоелектронної протидії, що забезпечує адаптивне виявлення, класифікацію та локалізацію джерел випромінювання, а також підтримку прийняття рішень, щодо динамічного управління спектром і підвищення стійкості комунікацій.

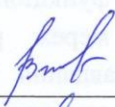
В роботі вперше розроблено та експериментально реалізовано програмний модуль навчання CNN на синтетичних даних для задач радіомоніторингу; забезпечено розпізнавання більше 15 класів сигналів у діапазоні 30 МГц–6 ГГц з точністю більше 95% при варіативних SNR і частотному маневруванні.

Створено прототип інформаційної технології моніторингу радіочастотного простору, який забезпечує виявлення, класифікацію та локалізацію джерел випромінювання в режимі реального часу. Технологія реалізована у вигляді модульної системи на базі SDR-платформ із можливістю адаптивного керування спектром, інтеграції до існуючих комплексів радіомоніторингу та розгортання в польових умовах.

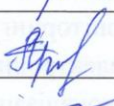
Комісією встановлено, що особливу увагу приділено розвитку програмно-визначених радіо (SDR), яке використовує програмне забезпечення замість звичайного обладнання для виконання функцій обробки радіосигналів, зокрема за допомогою нейронних мереж та штучного інтелекту.

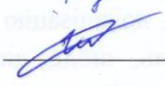
Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що впровадження розроблених в дисертаційному дослідженні елементів інформаційних технологій дозволяє моделювати різні сценарії радіоелектронної обстановки, у тому числі активну протидію, перевантаження спектра та взаємні завади. Отримані результати використано для калібрування параметрів системи, оцінки точності та часу реакції у реальних діапазонах частот. Таким чином результати дисертаційного дослідження використовуються в навчальному процесі Навчально-наукового інституту інформаційних технологій Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій.

Голова комісії:

 Вікторія ЖЕБКА

Члени комісії

 Андрій АРОНОВ

 Микола ГЕРЦЮК