

Триснюк Василь Миколайович*Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України, м. Київ*

ORCID: 0000-0001-9920-4879

Сметанін Кирило Володимирович*Житомирський військовий інститут ім. С.П. Корольова, м. Житомир*

ORCID 0000-0002-6062-550X

Яковенко Роман Миколайович*Житомирський військовий інститут ім. С.П. Корольова, м. Житомир*

ORCID 0009-0006-8095-5094

Дзюба Володимир Андрійович*Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України, м. Київ*

ORCID: 0009-0004-9576-814X

МЕТОДИКА УПРАВЛІННЯ ДИНАМІЧНИМ РОЗПОДІЛОМ ЧАСТОТНОГО РЕСУРСУ В УМОВАХ РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ БОРОТЬБИ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ SDR ТЕХНОЛОГІЙ

Анотація. У нинішніх умовах активного радіоелектронного протистояння та необхідності надійного захисту інформаційного простору проблема ефективного управління частотним ресурсом стає надзвичайно актуальною. Вплив засобів радіоелектронної боротьби (РЕБ) на канали зв'язку значно ускладнює функціонування як військових, так і цивільних комунікаційних систем. У цьому контексті важливою є розробка адаптивних підходів до розподілу частотного спектра, здатних швидко реагувати на зміну умов у радіочастотному середовищі.

У статті представлено авторську методику динамічного керування частотним ресурсом із використанням технологій програмно-визначеного радіо (SDR). Такий підхід забезпечує гнучке налаштування параметрів радіосистем у режимі реального часу, що дозволяє ефективно протидіяти перешкодам та загрозам глушіння. Методика враховує інтенсивність радіоперешкод, спектральну щільність сигналів, поточну ситуацію в ефірі та прогнозування ризиків втрати зв'язку.

Окремо розглянуто алгоритм моніторингу частотного спектра на базі SDR-приймача, який дозволяє оперативно визначати зони підвищеного радіошуму та швидко переключати передавачі на менш завантажені ділянки спектра. Також наведено архітектуру програмно-апаратного комплексу, що реалізує зазначені функції. Значна увага приділена питанням автоматизації вибору оптимального частотного діапазону із залученням машинного навчання та елементів штучного інтелекту. Результати моделювання засвідчують ефективність запропонованого підходу. Застосування SDR-технологій у динамічному управлінні частотним ресурсом дає змогу підвищити стійкість та надійність систем зв'язку в умовах інформаційного протистояння. Запропоновані рішення можуть бути інтегровані як у військові та спеціалізовані системи управління зв'язком, так і у перспективні телекомунікаційні проекти.

Ключові слова: інформаційні технології, частотний ресурс, SDR, радіоелектронна боротьба, спектральний моніторинг, штучний інтелект, адаптація, перешкоди.

Trysnyuk Vasyi*Institute of Telecommunications and Global Information Space of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv*

ORCID: 0000-0001-9920-4879

Smetanin Kyrylo*Korolov Zhytomyr Military Institute, Zhytomyr*

ORCID 0000-0002-6062-550X

Yakovenko Roman*Korolov Zhytomyr Military Institute, Zhytomyr*

ORCID 0009-0006-8095-5094

Dziuba Volodymyr*Institute of Telecommunications and Global Information Space of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv*

METHODOLOGY FOR MANAGING DYNAMIC ALLOCATION OF FREQUENCY RESOURCES UNDER ELECTRONIC WARFARE CONDITIONS USING SDR TECHNOLOGIES

Abstract. *In the current context of active electronic warfare and the growing need to secure the information space, efficient frequency resource management has become increasingly critical. The impact of electronic warfare (EW) systems on communication and data transmission channels significantly impairs the operation of both military and civilian communication systems. Therefore, the development of adaptive approaches to frequency spectrum allocation, capable of promptly responding to changes in the radio frequency environment, is of paramount importance.*

This paper presents an original methodology for dynamic frequency resource management using Software Defined Radio (SDR) technologies. This approach enables real-time, flexible adjustment of radio system parameters, allowing for effective counteraction against interference and jamming threats. The methodology takes into account the intensity of radio interference, the spectral density of signals, the current state of the electromagnetic environment, and the ability to predict potential communication loss risks.

The study also discusses an algorithm for spectrum monitoring based on an SDR receiver, which facilitates rapid identification of high radio noise areas and quick reconfiguration of transmitters to less congested frequency bands. The architecture of the software-hardware system implementing this methodology is described. Special attention is given to automating the process of selecting the optimal frequency range using machine learning and artificial intelligence techniques. Simulation results confirm the feasibility and effectiveness of the proposed approach. The use of SDR technologies in dynamic frequency management significantly enhances the resilience and reliability of communication systems under electronic warfare conditions. The proposed solutions can be integrated into existing military and specialized communication management systems, as well as applied in the development of advanced telecommunications projects.

Keywords: *information technology, frequency resource, SDR, electronic warfare, spectral monitoring, artificial intelligence, adaptation, interference.*

1. Вступ.

В умовах зростаючої складності сучасного радіочастотного середовища, зумовленої як активним використанням засобів радіоелектронної боротьби, так і зростанням обсягів переданих даних, зростає потреба в ефективному та гнучкому управлінні частотним ресурсом. Особливої актуальності ця проблема набуває у сферах, де критично важливими є стійкість і безперервність зв'язку — зокрема в оборонному секторі. Традиційні підходи до розподілу спектра часто не забезпечують достатньої адаптивності в умовах раптових змін або впливу перешкод. У зв'язку з цим дедалі більше уваги приділяється використанню технологій програмно-визначеного радіо (Software Defined Radio, SDR), які дозволяють оперативно змінювати параметри роботи радіосистем відповідно до поточних умов. У цій статті пропонується авторська методика динамічного керування частотним ресурсом, що базується на використанні SDR та враховує інтенсивність завад, спектральну обстановку та прогноз ризику втрати зв'язку. Основна увага приділяється розробці алгоритмів моніторингу, аналізу спектра і адаптивного налаштування частот з урахуванням принципів обчислювального інтелекту.

Метою дослідження є підвищення стійкості та надійності систем зв'язку в умовах радіоелектронного протистояння шляхом запровадження нових принципів управління частотним ресурсом.

2. Аналіз досліджень і публікацій.

Тема динамічного розподілу частотного ресурсу з використанням SDR-технологій, особливо в умовах радіоелектронної боротьби (РЕБ) [], активно досліджується як у теоретичному, так і в прикладному аспектах. Вже зараз можна виокремити кілька основних напрямків, які заслуговують на увагу.

Перш за все, багато дослідників зосереджені на розвитку систем когнітивного радіо. Наприклад, у працях Zhang [1] та його колег описані математичні моделі управління частотним ресурсом, які дозволяють динамічно змінювати параметри передачі залежно від рівня перешкод і потреб користувача. Це створює основу для побудови більш гнучких і надійних систем зв'язку [6].

Окремий напрям — використання методів глибинного навчання з підкріпленням (deep reinforcement learning). Ці підходи дають можливість системам самостійно навчатися оптимального розподілу частот, навіть у складному багатокористувацькому середовищі. Дослідження у цій галузі показують, що ефективність таких моделей поступово наближається до теоретичного максимуму [2].

Варто також звернути увагу на практичні реалізації цих рішень із використанням платформ GNU Radio та SDR-пристроїв USRP. У дослідженнях встановлено, що навіть на базі відкритих

інструментів можна побудувати робочі прототипи систем динамічного доступу до спектру, які суттєво підвищують ефективність його використання [3].

Ще один важливий аспект — це інтеграція SDR із системами РЕБ. Тут з'являються комплексні рішення, які поєднують когнітивне радіо, адаптивне управління сигналами та алгоритми боротьби з перешкодами. Наприклад, в останніх патентах описуються системи, що самостійно визначають пріоритетні частоти для моніторингу або передачі залежно від змін у радіоелектронній обстановці [4].

Окремо слід згадати й українські дослідження. В умовах воєнного конфлікту тематика РЕБ і захисту радіозв'язку набула особливого значення. Наші фахівці працюють над створенням адаптивних рішень для протидії БпЛА, покращення розвідки радіочастотного середовища та оптимізації сигналів у складних умовах.

Отже, аналіз наявних праць свідчить про активний розвиток технологій SDR у поєднанні з когнітивними підходами до управління частотним ресурсом. Особливої уваги заслуговують ті рішення, які забезпечують гнучкість і стійкість до завад — саме такі технології мають найбільший потенціал для застосування в умовах РЕБ. Це створює надійну базу для подальшої розробки ефективної методики динамічного розподілу спектру.

3. Мета і задачі дослідження

Мета дослідження полягає у створенні ефективної методики динамічного управління частотним ресурсом в умовах радіоелектронної боротьби з використанням SDR-технологій. Основна увага приділяється забезпеченню стійкості та надійності роботи систем зв'язку навіть в умовах активних перешкод, з використанням гнучких, адаптивних підходів до розподілу спектру.

Об'єктом дослідження є процес управління частотним ресурсом у системах радіозв'язку в умовах впливу радіоелектронних засобів боротьби.

Предмет дослідження — методи та алгоритми динамічного розподілу частотного ресурсу з використанням SDR-технологій у складних умовах РЕБ.

Для досягнення цієї мети в рамках дослідження були визначені наступні **задачі**:

1. Проаналізувати існуючі наукові підходи та практичні реалізації методів динамічного розподілу частотного ресурсу в SDR-системах, особливо в контексті когнітивного радіо і РЕБ.
2. Визначити вимоги до систем динамічного управління спектром у складних умовах — з урахуванням перешкод, часових обмежень, критичності каналів зв'язку тощо.
3. Розробити концептуальну модель SDR-системи, яка зможе в режимі реального часу змінювати частотні параметри передачі залежно від ситуації в радіоєфірі.
4. Реалізувати базову симуляцію або експериментальну перевірку роботи запропонованої методики (наприклад, на базі GNU Radio + USRP) [5].
5. Провести оцінювання ефективності: як швидко система реагує на зміну радіоелектронної обстановки, наскільки стабільним залишається зв'язок, і як рівномірно використовується спектр.
6. Сформулювати практичні рекомендації для впровадження методики в системах зв'язку, що працюють в умовах бойових дій або складного радіоелектронного середовища.

4. Виклад основного матеріалу

Одним із найбільш перспективних напрямів у розвитку сучасних бездротових систем зв'язку є впровадження технологій програмно-визначеного радіо (SDR), які, у поєднанні з концепцією когнітивного радіо (CR), забезпечують гнучке та адаптивне управління спектральними ресурсами. Це особливо важливо в умовах радіоелектронної боротьби (РЕБ) [8], де традиційні методи частотного планування виявляються малоефективними через непередбачуваність перешкод.

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

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

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:

$$Q(s, f) \leftarrow Q(s, f) + \alpha \left[r + \gamma \max_{f'} Q(s', f') - Q(s, f) \right] \quad (2)$$

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 пріоритизація 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. 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 [6]. 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 масштабується для використання в мережах з багатьма вузлами та може працювати в автономному або координаційному режимі. Дана концепція представлена на рис. 1.

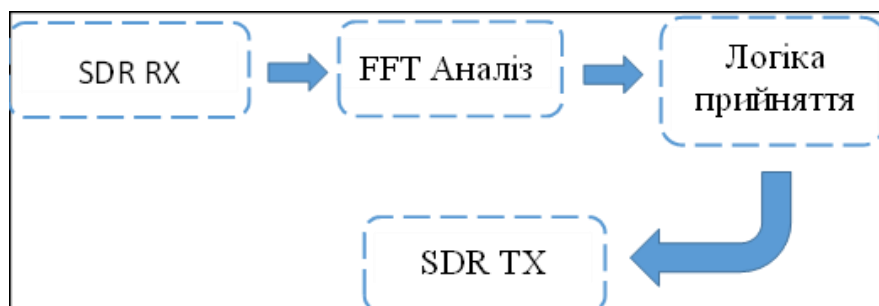


Рис. 1. Концептуальна модель SDR-системи з динамічним управлінням спектром

На етапі аналізу спектру система обчислює енергетичний профіль сигналу через:

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] * e^{-j\frac{2\pi kn}{N}}, \quad (3)$$

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

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.

Найоптимальніший канал обирається автоматично, і його параметри передаються модулю керування передачею для оперативного перемикавання 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++) [9], 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.

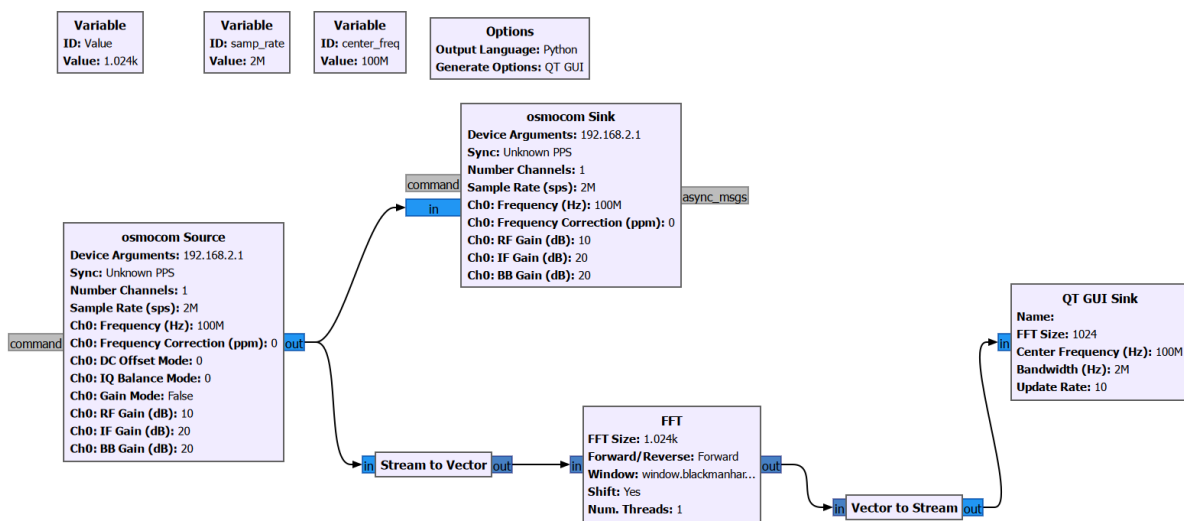


Рис. 2. Модель для дослідження та оптимізації когнітивних радіомереж в середовищі GNU Radio Companion 3.10.12.0.

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.2, результат роботи цієї системи представлено на рис.3.

Наступним кроком є, оцінка ефективності розробленої методики 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 (ПБП) та втрат пакетів. Використання адаптивних алгоритмів управління частотним ресурсом дає змогу утримувати ПБП 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 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.

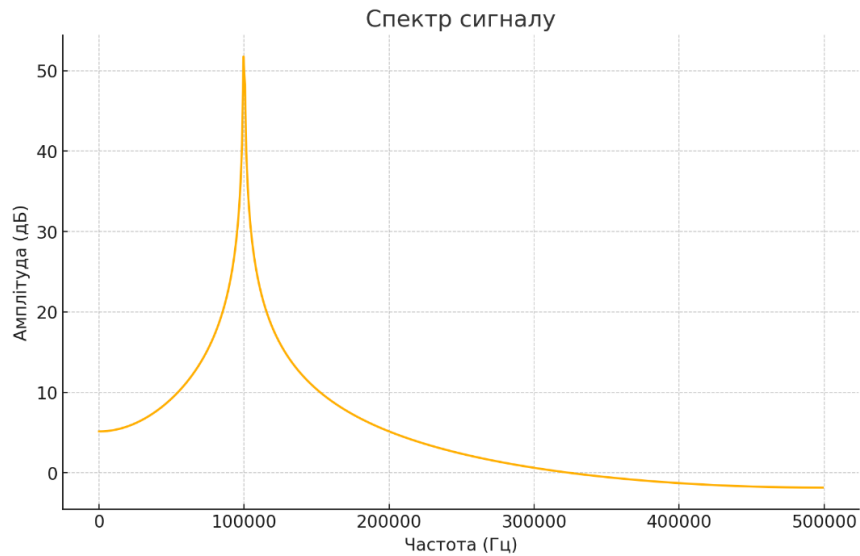


Рис. 3. Результат роботи в середовищі когнітивних радіомереж в середовищі GNU Radio Companion 3.10.12.0.

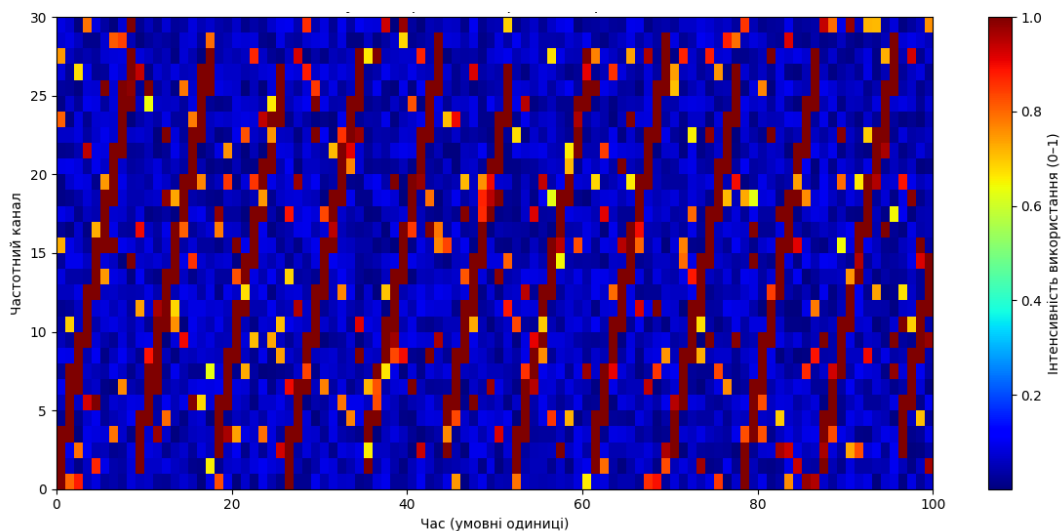


Рис. 4. Динамічне використання спектру в часі: адаптація робочих частот SDR-системи під впливом радіоелектронних перешкод.

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.

Заключним етапом запропонованої методики 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 (наприклад, ADALM-Pluto, USRP, LimeSDR) [9]. 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. [7,11] Це дозволить виявити потенційні слабкі місця системи.

Висновки і перспективи подальших досліджень. Запропонована методика, за умови дотримання наведених рекомендацій, може бути ефективно інтегрована в структури тактичного й оперативного зв'язку в умовах радіоелектронного протистояння. Її реалізація сприятиме підвищенню живучості каналів зв'язку, зменшенню впливу радіоелектронних атак та забезпеченню стабільного інформаційного обміну навіть у складних бойових умовах.

Список використаної літератури

1. Zhang, Y., Cheng, J., Hossain, E. Spectrum Sharing for Wireless Communications: A Cognitive Radio Approach. – Cambridge University Press, 2020. – 380 p.
2. Elsayed M. H. M., El-Sherif A. A., Mohamed A. DDSAT: Distributed Dynamic Spectrum Access Protocol Implementation Using GNURadio and USRP / M. Elsayed, A. El-Sherif, A. Mohamed // Proc. SDR-WInnComm, 2014. arXiv:1412.4999. DOI: 10.48550/arXiv.1412.4999.
3. Bhunia S., Sengupta S. Duplex DSA з мультиінтерфейсами на USRP // IEEE Commun. Lett., 2017.
4. Smith J., Brown A. System and method for dynamic frequency selection in cognitive radio networks: пат. США US9876543B2, опубл. 20.02.2018.
5. Shah A. et al. Автономне спектральне управління для військових систем / Mil. Commun. J., 2011.
6. DARPA XG Program: Cognitive Radio Waveforms 2010–2015.
7. GNU Radio Foundation. GNU Radio Documentation [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://wiki.gnuradio.org> – Дата звернення: 24.06.2025.
8. Трофимчук, О. В., Петров, С. О. Управління ресурсами радіомереж в умовах загроз РЕБ // Наука і техніка Повітряних Сил ЗС України. – 2022. – № 2(47). – С. 58–65.
9. Analog Devices. ADALM-PLUTO User Guide [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://wiki.analog.com/university/tools/pluto> – Дата звернення: 24.06.2025.
10. Smetanin K. Cluster approach of building networks as a way of ensuring the appropriate level of cyber security of the information and telecommunication system // Vol. 29 No. 1 (2023): Ukrainian Scientific Journal of Information Security. URL: <https://doi.org/10.18372/2225-5036.29.17547>
11. Mathur, S. GNU Radio Programming for Beginners. – Packt Publishing, 2021. – 328 p.
12. Anakhov, P., Zhebka, V., Tushych, A., ... Skladannyi, P., Sokolov, V. Evaluation method of the physical compatibility of equipment in a hybrid information transmission network / Journal of Theoretical and Applied Information Technology Open source preview, 2022, 100(22), p. 6635–6644