



DOI 10.28925/2663-4023.2023.20.220229

УДК [004.738.5:351]621.396.6

**Семендйй Сергій Матвійович**

аспірант

місце роботи: Національний університет «Чернігівська політехніка», Чернігів, Україна

ORCID ID: 0000-0002-7751-5956

*serhii\_semendiai@icloud.com*

## ВИКОРИСТАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ КОГНІТИВНОГО РАДІО ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ БЕЗПРОВОДОВИХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ В УМОВАХ АКТИВНОГО ЗАСТОСУВАННЯ ЗАСОБІВ РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ БОРОТЬБИ

**Анотація.** Стаття присвячена розробці методу підвищення ефективності каналів зв'язку безпілотних літальних апаратів (БпЛА) в умовах радіоелектронної боротьби (РЕБ). Проаналізовано загрози, які можуть бути спричинені застосуванням засобів радіоелектронної боротьби проти автономних БпЛА. Проведено огляд деяких технологій, які можуть бути використані для створення оригінальних вітчизняних алгоритмів протидії РЕБ та підвищення автономності БпЛА на полі бою. Розглянуто можливість використання непрофесійного SDR-радіообладнання та програмно-апаратних платформ з відкритим вихідним кодом для розробки та верифікації цих алгоритмів протидії. Отримала подальший розвиток ідея застосування адаптивного кодування в каналах зв'язку БпЛА з використанням багатокомпонентних турбокодів у поєднанні з нейронними мережами, які одночасно використовуються для когнітивного радіо. Стаття присвячена проблемам створення моделей і методів забезпечення цілісності інформації в безпроводових системах передачі даних в умовах активного застосування засобів радіоелектронної боротьби.

**Ключові слова:** когнітивне радіо; програмно визначене радіо; нейронні мережі; кодування; радіоелектронна боротьба; канал зв'язку; бездротові засоби зв'язку; аналіз спектра.

### ВСТУП

Багато країн мають спеціалізовані військові навчальні центри, де проводяться курси з навчання військових операторів безпілотних літальних апаратів (БпЛА). Ці центри мають тренувальні системи та симулятори, що дозволяють операторам отримувати практичні навички роботи з реальними чи віртуальними БпЛА. Військові академії та школи можуть включати навчання операторів БпЛА в свої освітні програми. Сюди входять теоретичні курси, практичні тренування та полігонні вправи з реальними БпЛА.

Проте, наразі існує попит на БпЛА, які здатні працювати на полі бою «з коробки», без спеціально навченого персоналу. Це пов'язано з нарощуванням інтересу до автономних систем у військовій сфері й розширенням їхнього потенціалу застосування. БпЛА з автономними функціями дозволяють виконувати певні розвідувальні, спостережні та бойові завдання на полі бою без присутності людини на місці. Це збільшує ефективність операцій та знижує ризик для людського персоналу. Використання автономних БпЛА може допомогти знизити витрати, пов'язані з утриманням та навчанням кваліфікованих фахівців-операторів. Операції таких систем можуть бути менш витратними та більш ефективними з економічної точки зору.

На даний час технології, що забезпечують повну автономність БпЛА на полі бою, все ще потребують подальшого розвитку та вдосконалення. Особливо це стосується рівня штучного інтелекту та машинного навчання, необхідного для того, щоб БпЛА могли приймати вірні рішення у мінливих умовах бойових дій.



**Постановка проблеми.** Безпілотні літальні апарати, що працюють на полі бою без спеціально навченого персоналу, можуть стикатися з різними загрозами від засобів радіоелектронної боротьби (РЕБ) противника. У контексті застосування розроблюваного нами методу протидії розглянемо наступні загрози:

перешкоджання сигналу зв'язку каналу управління між БПЛА та базовою станцією – це може призвести до втрати зв'язку і контролю над БПЛА, що ускладнює виконання місії та може призвести до втрати БПЛА;

генерування засобами РЕБ електромагнітних сигналів, які спричиняють інтерференцію з радіочастотним спектром, що використовується БПЛА для комунікації та спостереження – це може призвести до зниження якості сигналу, погіршення здатності передавати дані або навіть до втрати сигналу.

Вирішити цю проблему може розробка оригінальних вітчизняних методів протидії із застосуванням технологій програмно визначеного радіо (SDR), когнітивного радіо та штучних нейронних мереж.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Когнітивне радіо є результатом досліджень і розробок у галузі бездротових комунікацій та радіотехніки. Концепцію когнітивного радіо вперше запропонували двоє вчених: Джозеф Міценмейкер (Joseph Mitola III) та Герман Дайл (Gerald J. DAI). Джозеф Міценмейкер, інженер-дослідник та практик, вперше використав термін «когнітивне радіо» у своїй дисертаційній роботі "Cognitive Radio: An Integrated Agent Architecture for Software Defined Radio" в 1999 році. Він описав концепцію радіо, яке може адаптуватися до змінних умов радіочастотного середовища, використовуючи інтелектуальні алгоритми. Герман Дайл, фахівець у галузі радіотехніки та спеціаліст з бездротових комунікацій, також вніс вагомий внесок у розвиток когнітивного радіо. Він проводив дослідження щодо використання неупорядкованих радіочастотних ресурсів та розробки методів спектрального доступу, які стали основою для подальшого розвитку когнітивного радіо. В результаті спільних зусиль багатьох дослідників та інженерів, концепція когнітивного радіо розвивалася та впроваджувалася у різних галузях бездротових комунікацій. Займалася цим як академічна спільнота, так і промислові компанії й організації стандартизації, такі як IEEE (Інститут інженерів з електротехніки та електроніки).

Недовикористання спектра може призводити до недостатньої ефективності бездротових комунікаційних систем та обмежень у розвитку нових технологій. Для розв'язання цієї проблеми розробляються технології, такі як когнітивне радіо, які дозволяють ефективніше використовувати доступний спектр, враховуючи змінні умови та вимоги користувачів.

Проблема «недовикористаного» спектра (також відома як «спектральне забруднення» або «спектральний голод») виникає тоді, коли доступний радіочастотний спектр не використовується ефективно або повністю. Ця проблема має місце через обмежені ресурси спектра та неефективне розподілення радіочастотних діапазонів між різними користувачами.

Деякі частини радіочастотного спектра можуть бути зайняті пасивними користувачами, такими як радіозонди метеорологічних служб або супутникові системи, які не використовують спектр активно. Це може призводити до недоступності цих частин спектра для інших користувачів. Деякі користувачі можуть мати застарілі або незадіяні радіосистеми, які не використовують спектр повністю або ефективно. Наприклад, деякі телекомунікаційні мережі можуть займати широкі діапазони спектра, але не використовувати його повністю через низьку щільність користувачів.

Відсутність ефективних механізмів координації та управління спектром може призводити до неправильного розподілу спектральних ресурсів між користувачами. Це може призвести до конфліктів та перекриття використання спектра, що зменшує ефективність його використання. Деякі частини спектра можуть бути заблоковані або зайняті певними користувачами або службами, що унеможливить доступ до них іншим користувачам. Це може бути через розподіл спектра за ліцензіями або певними обмеженнями на його використання.

Спостерігаючи, що в деяких місцях або в певний час доби до 70% розподіленого спектра може простоювати, Федеральна комісія з питань зв'язку (FCC) у діаграмі розподілу частот для Сполучених Штатів, показаній на рис. 1, нещодавно зробила рекомендації, що значно більшу спектральну ефективність можна досягти за допомогою розгортання бездротових пристроїв, які можуть адаптуватися до основних користувачів, використовуючи доступні обмежені ресурси та мінімізуючи завади. Таким чином, розбіжність між розподілом спектра та його використанням свідчить про те, що цей дефіцит спектра можна подолати, дозволивши більш гнучке використання спектра [1].

### UNITED STATES FREQUENCY ALLOCATIONS THE RADIO SPECTRUM

**RADIO SERVICES COLOR LEGEND**

AMATEUR SERVICE	INTERNATIONAL MOBILE SATELLITE	MOBILE SATELLITE
AMATEUR SATELLITE	LAND MOBILE	NAVIGATION
AMATEUR RADIO	LAND MOBILE SATELLITE	NAVIGATION SATELLITE
AVIATION	MARITIME MOBILE	NAVIGATION SATELLITE
AVIATION SATELLITE	MARITIME MOBILE SATELLITE	NAVIGATION SATELLITE
BROADCASTING	MARITIME MOBILE SATELLITE	NAVIGATION SATELLITE
BROADCASTING SATELLITE	METEOROLOGICAL SATELLITE	SPACE RESEARCH
COAST GUARD SATELLITE	METEOROLOGICAL SATELLITE	SPACE RESEARCH
COAST GUARD SATELLITE	METEOROLOGICAL SATELLITE	SPACE RESEARCH
FIXED	MOBILE	STANDARD FREQUENCY
FIXED SATELLITE	MOBILE SATELLITE	STANDARD FREQUENCY
FIXED SATELLITE	MOBILE SATELLITE	STANDARD FREQUENCY

**ACTIVITY CODE**

GOVERNMENT OCCUPANCY	GOVERNMENT/GOVERNMENT SHARED
NON-GOVERNMENT OCCUPANCY	NON-GOVERNMENT OCCUPANCY

**ALLOCATION USAGE DESIGNATION**

SERVICE	EXAMPLE	DESCRIPTION
Primary	F1D1	Fixed Land
Secondary	B1D1	Fixed Land

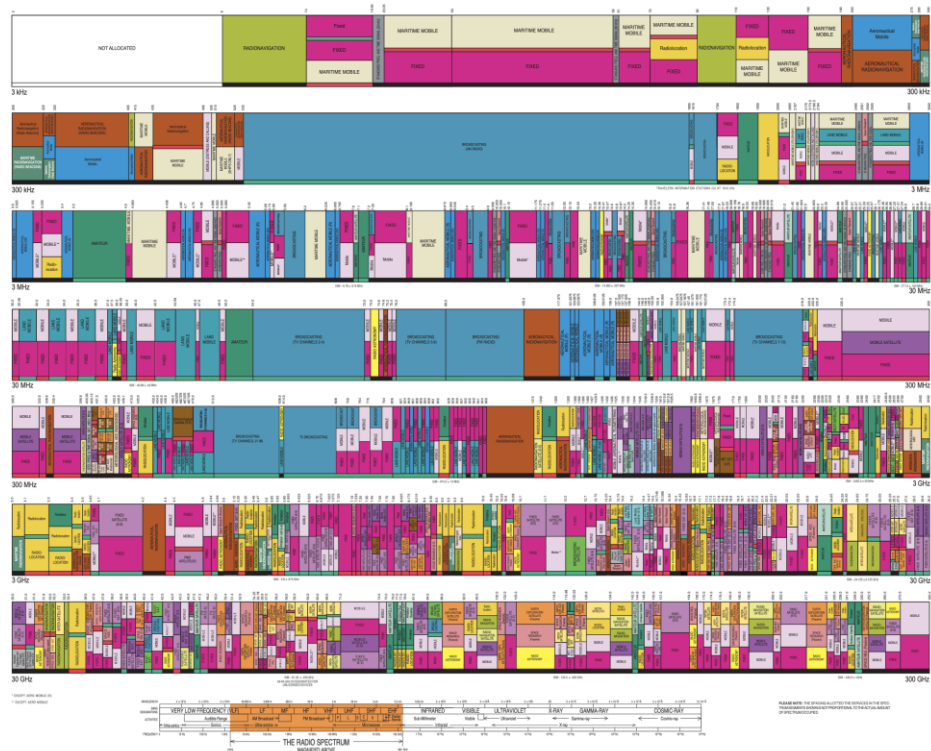


Рис.1. Діаграма розподілу радіочастот Сполучених Штатів

Агентство перспективних досліджень оборони (DARPA) США розробило програму DARPA Adaptive RF Technology (ART Program). Метою цієї програми є розвиток нових технологій та інноваційних підходів до радіочастотних систем, що забезпечують адаптивність та високу ефективність в умовах складних та змінних радіочастотних середовищ. Основна ідея ART Program полягає в створенні нових радіочастотних систем, які здатні автоматично адаптуватися до змінних умов експлуатації та оптимізувати свою роботу для досягнення максимальної продуктивності. Це включає в себе розробку адаптивних алгоритмів, архітектур та компонентів



радіосистем, що дозволяють швидко реагувати на зміни спектра та оптимізувати передачу та прийом сигналів.

ART Program має за мету покращити ефективність бездротових комунікацій, спостереження, радіолокації та інших радіочастотних застосувань шляхом розробки нових технологій та методів. Це може включати розробку систем, здатних виявляти та аналізувати радіочастотне середовище, пристосовуватися до інтерференції та шуму, оптимізувати розподіл ресурсів спектра та забезпечувати надійну й швидку передачу даних. ART Program впроваджується через співпрацю з військовими дослідницькими лабораторіями, університетами, промисловими підприємствами та іншими науковими установами з метою забезпечення інноваційних рішень та передових технологій у галузі радіочастотних систем.

Однією з основних цілей ART Program є створення радіочастотних систем, які забезпечують більшу адаптивність, ефективність та надійність в умовах змінних радіочастотних середовищ. Це може мати значний вплив на розвиток комунікаційних систем, військових застосунків, безпілотних літальних апаратів та багатьох інших галузей, де використовуються радіочастотні технології [2].

Проведений аналіз останніх досліджень і публікацій показав, що не дивлячись на великий спектр наукових праць, на сьогодні не існує універсальних методів протидії впливам засобів РЕБ на бездротові системи передавання даних. Технології SDR та когнітивного радіо можуть бути використані для створення оригінальних вітчизняних алгоритмів протидії й підвищити ефективність бездротових засобів передавання даних БпЛА.

**Метою статті** є розробка методу протидії засобам радіоелектронної боротьби для використання у бездротових системах передачі даних БпЛА з використанням технологій когнітивного радіо та нейронних мереж.

## ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Оскільки розробка методу протидії засобам РЕБ є актуальною і складною проблемою, багато дослідників та організацій, таких як військові дослідницькі лабораторії, університети та промислові компанії, працюють над цим напрямом. Їхні дослідження та розробки спрямовані на створення ефективних та надійних методів протидії, щоб забезпечити безперебійну роботу каналу зв'язку БпЛА в умовах впливу засобів РЕБ.

Основна ідея розроблюваного методу полягає у тому, що когнітивне радіо може використовувати діапазони частот, які не «глушаться» засобами РЕБ противника і залишені ним для зв'язку своїх підрозділів, шляхом використання технології повторного використання спектра (spectral reuse). Ця технологія дозволяє використовувати частоти, які не використовуються у даному місці в даний час, та дозволяє збільшити ефективне використання радіочастотного спектра. Крім того, когнітивне радіо може аналізувати радіочастотний спектр в режимі реального часу та визначати доступні діапазони частот для передачі сигналу з максимальною ефективністю та мінімальним впливом на інші радіозасоби. Це дозволяє забезпечити ефективне використання радіочастотного спектра та уникнути завад у зв'язку.

Щоб краще розуміти, що таке когнітивне радіо саме стосовно нашої задачі, почнемо з програмно-визначеного радіо (Software Defined Radio, SDR), яке є базовою платформою для когнітивного радіо. Когнітивні радіостанції – це радіозастосунки, які

розміщуються поверх платформи SDR, що реалізується в основному за допомогою процесорів загального призначення (GPP) і цифрових сигнальних процесорів (DSP) [3].

Пристрої зв'язку, такі як традиційна радіосистема, підтримують фіксовану кількість каналів або діапазонів частот, але проблема полягає в тому, що канали й частотні діапазони повинні бути обрані під час проектування, а не на більш пізній стадії, оскільки не існує механізму, який би дозволив здійснити будь-яке коригування після проектування, тобто під час експлуатації й відповідно до поточних потреб. У пошуках кращого вирішення цієї проблеми було запроваджено порівняно нову концепцію під назвою Software Defined Radio. Вона була розроблена на основі ідеї традиційної радіосистеми, але з невеликими змінами в конструкції. У SDR поведінка фізичного рівня радіостанції та її функціональність визначаються програмним забезпеченням. У SDR різні компоненти системи радіозв'язку, такі як підсилювач і фільтри, реалізовані в програмних інструкціях, а не в апаратному забезпеченні [4].

## МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

Для розроблення й перевірки ефективності нашого методу використовуватимемо в якості апаратного забезпечення пристрій HackRF One від компанії Great Scott Gadgets (рис.2) – це програмно-визначена радіопериферія, здатна передавати або приймати радіосигнали в діапазоні від 1 МГц до 6 ГГц, що відповідає нашим потребам. HackRF One – апаратна платформа з відкритим вихідним кодом, яку можна використовувати як USB-периферійний пристрій або запрограмувати для автономної роботи [5].

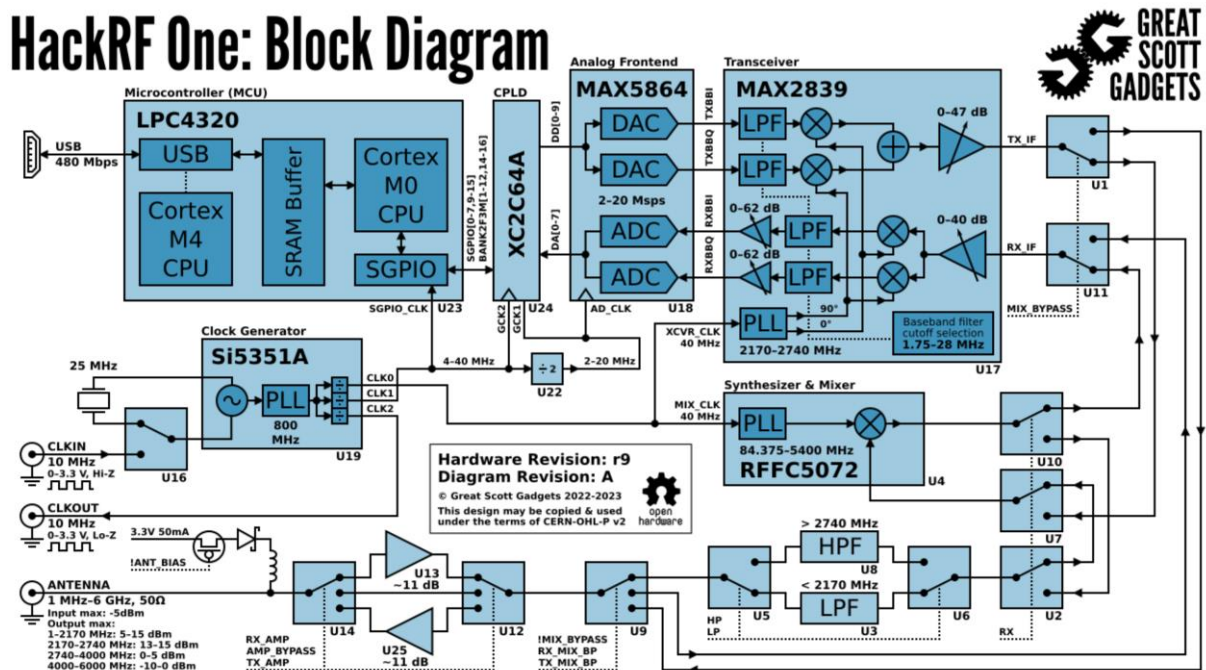


Рис. 2. Блок-діаграма SDR-радіо HackRF One

Для реального застосування в БПЛА слід застосовувати більш професійні SDR-радіомодулі, з характеристиками, що задовольнять реальні потреби. Але для розробки нашого методу буде цілком достатньо двох пристроїв HackRF One, та як їхній радіотракт працює у напівдуплексному режимі.

В якості програмного забезпечення використовуватимемо застосунок GNU Radio Companion. GNU Radio – це вільний інструментарій для розробки програмного забезпечення, який надає блоки обробки сигналів для реалізації програмно-визначених радіостанцій та систем обробки сигналів. Його можна використовувати із зовнішнім радіочастотним обладнанням для створення програмно-визначених радіостанцій, або без обладнання у середовищі, подібному до симулятора. Він широко використовується в аматорському, академічному та комерційному середовищах для підтримки як досліджень бездротового зв'язку, так і реальних радіосистем [6].

Програмне забезпечення GNU Radio надає структуру та інструменти для створення і запуску програмних радіостанцій або просто програм обробки сигналів загального призначення. Самі програми GNU Radio зазвичай відомі як "флюграфи", які являють собою серію блоків обробки сигналів, з'єднаних разом, таким чином описуючи потік даних (рис. 3). Ці блок-схеми можуть бути написані як на C++, так і на Python. Інфраструктура GNU Radio повністю написана на C++, а багато користувацьких інструментів (таких як GNU Radio Companion) написані на Python.

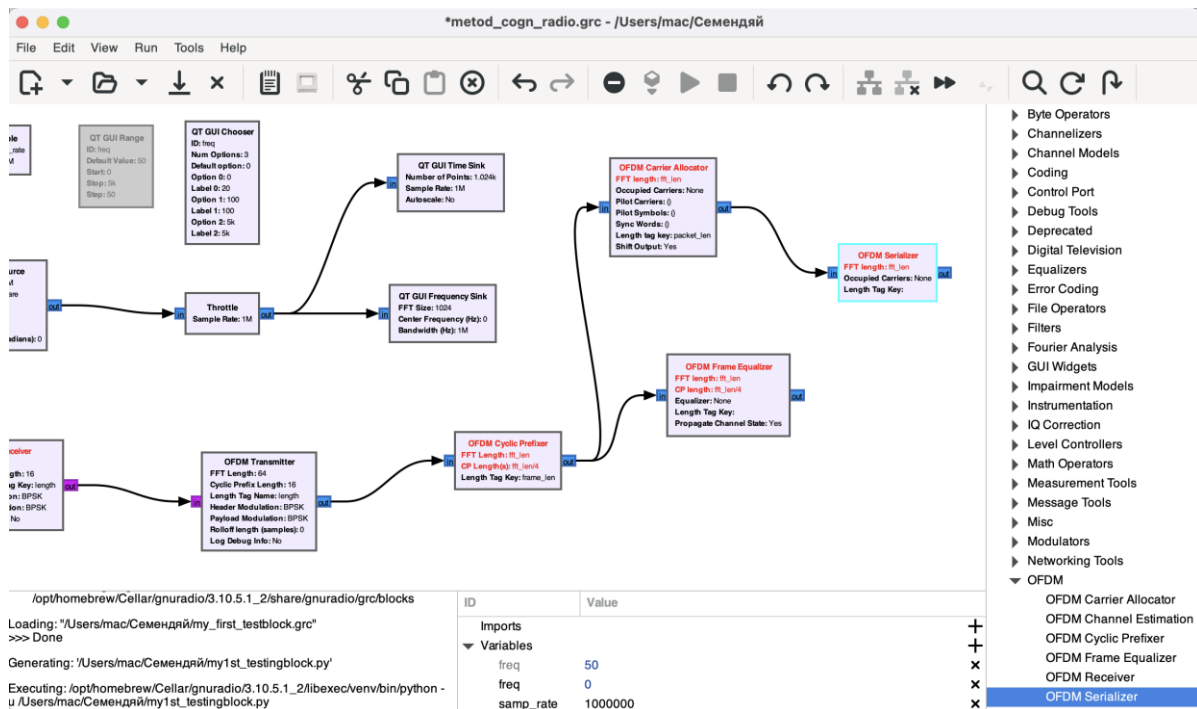


Рис. 3. Робота з SDR-блоками в програмному середовищі GNU Radio Companion

Як і у всіх програмно-визначених радіосистемах, реконфігурованість є ключовою особливістю. Замість того, щоб використовувати різні радіостанції, призначені для конкретних, але різних цілей, можна використовувати одну універсальну радіостанцію як інтерфейс, а програмне забезпечення для обробки сигналів виконує обробку, специфічну для конкретної радіопрограми.

## РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Розробка методу протидії впливу засобів РЕБ противника на канал зв'язку БПЛА з використанням технології когнітивного радіо включатиме кілька етапів.



Перший етап – це аналіз радіочастотного середовища, включаючи виявлення потенційних джерел інтерференції або блокування сигналу засобами РЕБ. Це може включати виявлення і класифікацію радіочастотних сигналів, аналіз спектральної активності та виявлення вразливих діапазонів частот.

Наступний крок – розробка адаптивних алгоритмів для забезпечення неперервної та ефективної роботи каналу зв'язку БпЛА. Ці алгоритми можуть включати в себе методи динамічного управління каналом, спектрального доступу та модуляції для уникнення інтерференції або роботи в інших доступних діапазонах частот.

Один з ключових елементів методу – адаптивне керування передачею даних. Це включає в себе розробку алгоритмів для динамічного змінювання параметрів передачі, таких як потужність, модуляція, кодування та частотний діапазон, для уникнення завад від засобів РЕБ та забезпечення надійної передачі.

Оскільки вплив засобів РЕБ може включати спроби перехоплення або злому зв'язку, важливим етапом є забезпечення безпеки і шифрування передачі даних. Це може включати в себе використання шифрування даних, аутентифікації та інших заходів для захисту від несанкціонованого доступу та зловживання. Проте, в даному методі ці заходи розглядатися не будуть. Вважатимемо, що вони в нас вже є за замовчуванням, входять у систему формування корисних сигналів для передачі.

Останній етап – тестування та перевірка розробленого методу. Це включає проведення експериментів у контрольованому середовищі або на реальних БпЛА з метою перевірки ефективності та надійності методу в умовах інтерференції від засобів РЕБ.

Розробка методу протидії впливу засобів РЕБ на канал зв'язку БпЛА є складним завданням, яке вимагає великої кількості досліджень, розробок і тестувань. На кожному з етапів, зазначених вище, потрібно провести детальну аналітику, враховуючи специфіку БпЛА та його каналів зв'язку, а також можливі впливи засобів РЕБ.

Для ефективною розробки методу протидії потрібно використовувати інженерні підходи, математичне моделювання, комп'ютерне моделювання, створити експериментальні зразки та провести валідацію результатів. Також важливо враховувати специфічні вимоги та обмеження БпЛА, такі як обмеження енергоспоживання, розмір та вага обладнання. Загальний вигляд розробленого методу протидії впливу засобів РЕБ на канал зв'язку БпЛА наведено на рис. 4.

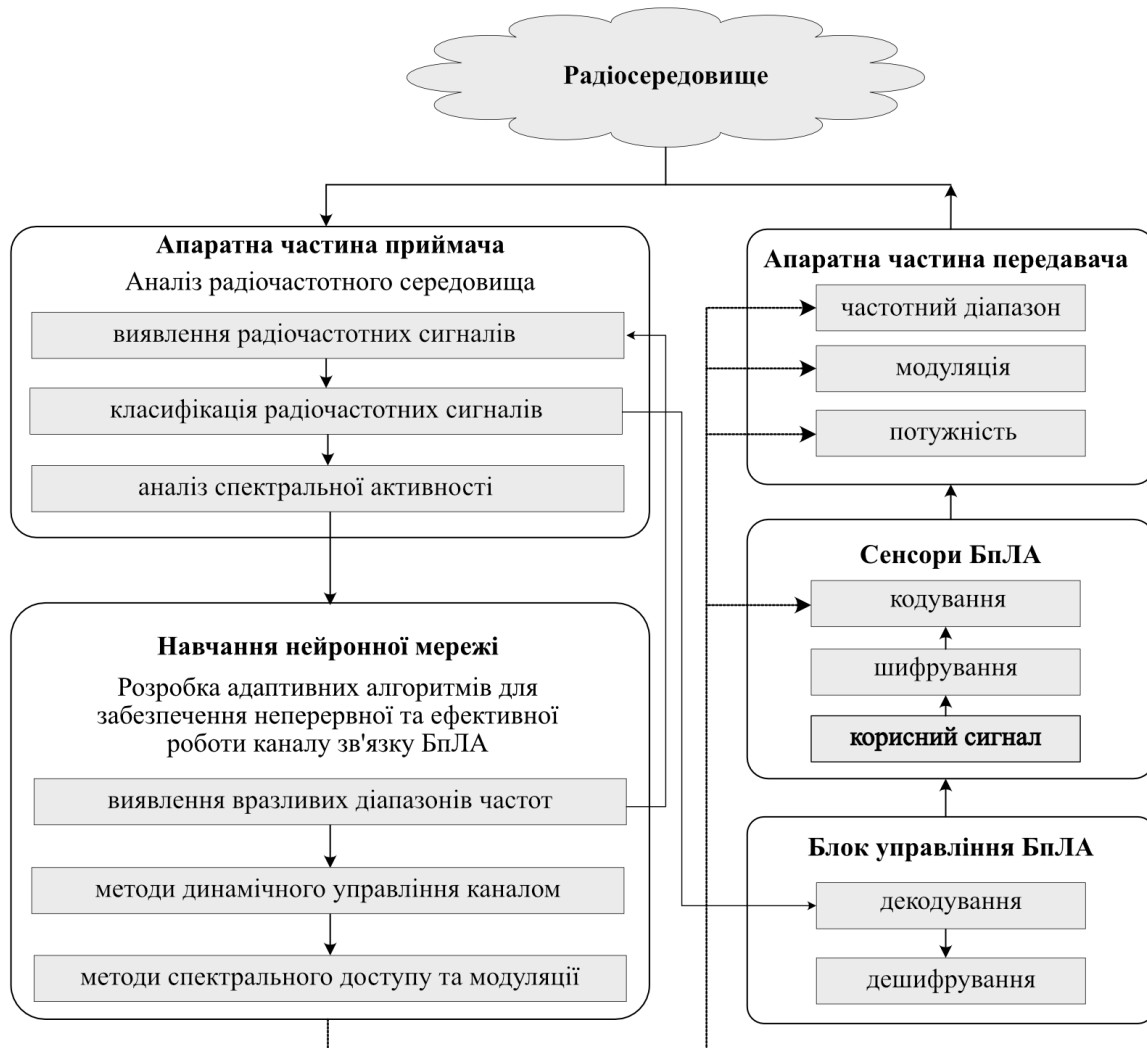


Рис. 4. Метод протидії засобом радіоелектронної боротьби для використання у бездротових системах передачі даних БпЛА з використанням технологій когнітивного радіо та нейронних мереж

Для наших інформаційних потоків застосовуємо також адаптивне кодування із використанням багатокомпонентних турбокодів. Турбокоди є одними з найефективніших кодів для каналів передачі даних. Оскільки когнітивне радіо використовує доступ до радіочастотного спектра, який може бути перенасиченим і вимагати використання менших діапазонів частот, технології з кодуванням та декодуванням, такі як турбокодування, можуть бути корисними для забезпечення більшої ефективності передачі даних в обмежених частотних діапазонах. Використання інформації від нейронної мережі про наступні зміни в каналі зв'язку скоротить час адаптації системи кодування, що зменшить кількість помилок при передачі даних та збільшить надійність комунікації, особливо в умовах використання динамічного доступу до спектра.



**ВИСНОВКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ**

На сьогодні є очевидним, що існує нагальна потреба у технологіях забезпечення автономності БПЛА на полі бою. Одним із ключових напрямків досягнення такої автономності є створення моделей і методів підвищення ефективності безпроводових систем передачі даних в умовах активного застосування засобів радіоелектронної боротьби через забезпечення достовірності інформації. В статті ми розглянули розробку методу протидії засобам радіоелектронної боротьби для використання у бездротових системах передачі даних БПЛА з використанням технологій когнітивного радіо та нейронних мереж. Подальші дослідження мають привести до створення оригінальних вітчизняних алгоритмів протидії РЕБ. Розглянули можливість використання непрофесійного SDR-радіообладнання та програмно-апаратних платформ з відкритим вихідним кодом для розробки та верифікації цих алгоритмів протидії. Отримала подальший розвиток ідея застосування адаптивного кодування в каналах зв'язку БПЛА з використанням багатокомпонентних турбокодів у поєднанні з нейронними мережами, які одночасно використовуються для когнітивного радіо.

**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

- 1 SukhPaulSingh, J., Singh, J., S. Kang, A. (2013). Cognitive Radio: State of Research Domain in Next Generation Wireless Networks - A Critical Analysis. *International Journal of Computer Applications*, 74(10), 1–9. <https://doi.org/10.5120/12918-9741>.
- 2 Dr David, K. Abe. Wideband Adaptive RF Protection (WARP). <https://www.darpa.mil/program/wideband-adaptive-rf-protection>.
- 3 Software Defined Cognitive Radio using Matlab. <https://www.scribd.com/doc/103610191/Cognitive-Radio>.
- 4 S.Banerjee, J., Karmakar, K. (2012). A Comparative study on Cognitive Radio Implementation Issues. *International Journal of Computer Applications*, 45(15), 44–51. <https://doi.org/10.5120/6858-9477>.
- 5 HackRF Product Line - Great Scott Gadgets. *Great Scott Gadgets*. <https://greatscottgadgets.com/hackrf/>.
- 6 Usage Manual - GNU Radio. *GNU Radio*. [https://wiki.gnuradio.org/index.php?title=Usage\\_Manual](https://wiki.gnuradio.org/index.php?title=Usage_Manual).
- 7 Valieva, I. (2020). *Spectrum Sensing for Dynamic Spectrum Access in Cognitive Radio*. <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:mdh:diva-52881>.
- 8 Rathika, M., Sivakumar, P., Ramash Kumar, K., Garip, I. (2022). Cooperative Communications Based on Deep Learning Using a Recurrent Neural Network in Wireless Communication Networks. *Mathematical Problems in Engineering*, 2022, 1–12. <https://doi.org/10.1155/2022/1864290>.
- 9 Jiang, W., Schotten, H. D. (2020). Recurrent Neural Networks with Long Short-Term Memory for Fading Channel Prediction. In *2020 IEEE 91st Vehicular Technology Conference (VTC2020-Spring)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/vtc2020-spring48590.2020.9128426>.
- 10 Solutions - Saankhya Labs - software defined radios (SDR). *Saankhya Labs - software defined radios (SDR)*. <https://saankhyalabs.com/solutions/#cognitive-ran-solution>.

**Serhii Semendiai**

Graduate student

Work place: Chernihiv Polytechnic National University, Chernihiv, Ukraine

ORCID ID: 0000-0002-7751-5956

serhii\_semendiai@icloud.com

## THE USE OF COGNITIVE RADIO TECHNOLOGY TO IMPROVE THE EFFICIENCY OF WIRELESS DATA TRANSMISSION SYSTEMS IN THE CONDITIONS OF ACTIVE USE OF ELECTRONIC WARFARE

**Abstract.** The article discusses the development of a method for improving the efficiency of communication channels of unmanned aerial vehicles (UAVs) in the context of electronic warfare (EW). The threats that can be caused by the use of electronic warfare against autonomous UAVs are analyzed. A review of some technologies that can be used to create original domestic algorithms for countering electronic warfare and improve the autonomy of UAVs on the battlefield is carried out. The possibility of using non-professional SDR radio equipment and open source hardware and software platforms for the development and verification of these countermeasures algorithms is considered. The idea of applying adaptive coding in UAV communication channels using multicomponent turbo codes in conjunction with neural networks, which are simultaneously used for cognitive radio, was further developed. The article is devoted to the problems of creating models and methods for ensuring the integrity of information in wireless data transmission systems in the context of active use of electronic warfare.

**Keywords:** cognitive radio; software-defined radio; neural networks; coding; electronic warfare; communication channel; wireless communications; spectrum analysis.

### REFERENCES (TRANSLATED AND TRANSLITERATED)

1. SukhPaulSingh, J., Singh, J., S. Kang, A. (2013). Cognitive Radio: State of Research Domain in Next Generation Wireless Networks - A Critical Analysis. *International Journal of Computer Applications*, 74(10), 1–9. <https://doi.org/10.5120/12918-9741>.
2. Dr David, K. Abe. Wideband Adaptive RF Protection (WARP). <https://www.darpa.mil/program/wideband-adaptive-rf-protection>.
3. Software Defined Cognitive Radio using Matlab. <https://www.scribd.com/doc/103610191/Cognitive-Radio>.
4. S.Banerjee, J., Karmakar, K. (2012). A Comparative study on Cognitive Radio Implementation Issues. *International Journal of Computer Applications*, 45(15), 44–51. <https://doi.org/10.5120/6858-9477>.
5. HackRF Product Line - Great Scott Gadgets. *Great Scott Gadgets*. <https://greatscottgadgets.com/hackrf/>.
6. Usage Manual - GNU Radio. *GNU Radio*. [https://wiki.gnuradio.org/index.php?title=Usage\\_Manual](https://wiki.gnuradio.org/index.php?title=Usage_Manual).
7. Valieva, I. (2020). *Spectrum Sensing for Dynamic Spectrum Access in Cognitive Radio*. <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:mdh:diva-52881>.
8. Rathika, M., Sivakumar, P., Ramash Kumar, K., Garip, I. (2022). Cooperative Communications Based on Deep Learning Using a Recurrent Neural Network in Wireless Communication Networks. *Mathematical Problems in Engineering*, 2022, 1–12. <https://doi.org/10.1155/2022/1864290>.
9. Jiang, W., Schotten, H. D. (2020). Recurrent Neural Networks with Long Short-Term Memory for Fading Channel Prediction. In *2020 IEEE 91st Vehicular Technology Conference (VTC2020-Spring)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/vtc2020-spring48590.2020.9128426>.
10. Solutions - Saankhya Labs - software defined radios (SDR). *Saankhya Labs - software defined radios (SDR)*. <https://saankhyalabs.com/solutions/#cognitive-ran-solution>.



This work is licensed under Creative Commons Attribution-noncommercial-sharealike 4.0 International License.