

**Семендяй Сергій Матвійович**

аспірант

Національний університет «Чернігівська політехніка», Чернігів, Україна

ORCID: 0000-0002-7751-5956

serhii_semendiai@icloud.com

АДАПТИВНЕ СПЕКТРАЛЬНЕ МАНЕВРУВАННЯ В СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ РОБОТИЗОВАНИМИ КОМПЛЕКСАМИ В УМОВАХ РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ БОРОТЬБИ

Анотація. У статті представлено підхід до підвищення завадостійкості радіоканалів керування роботизованими комплексами в умовах активного радіоелектронного впливу шляхом впровадження механізму адаптивного спектрального маневрування. Запропонована імітаційна модель реалізована на базі SDR-платформи з елементами когнітивного аналізу спектра, що дозволяє динамічно змінювати частотно-часові параметри сигналу у відповідь на погіршення радіообстановки. Модель включає модулі моніторингу спектра, виявлення завад, аналізу показників якості каналу (BER, SNR) та блок адаптивного керування перебудовою частоти. Результати моделювання свідчать про суттєве зниження ймовірності помилок і збереження працездатності системи в порівнянні зі статично налаштованими каналами. Запропоноване рішення може бути використане в системах логістики, технічного моніторингу та безпілотного нагляду, зокрема в умовах навмисно зашумленого спектра.

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

ВСТУП

Роботизовані комплекси, зокрема автономні платформи наземного або повітряного базування, дедалі активніше впроваджуються в галузях логістики, промислового моніторингу, аграрного нагляду, енергетики та охорони територій. Їхня автономність, мобільність і здатність діяти в складних умовах забезпечують широкі можливості для автоматизації важливих рутинних процесів. Особливий інтерес до таких систем виявляють також державні органи, і вже у найближчому майбутньому прогнозується широке застосування дронів у діяльності підрозділів поліції, прикордонної служби, а також інших правоохоронних структур для виявлення порушень, патрулювання та реагування на інциденти в режимі реального часу.

Проте, одночасно з поширенням таких платформ, зростає і ризик впливу на їхні канали зв'язку з боку зловмисників, які можуть застосовувати спеціальні засоби постановки радіозавад для порушення або перехоплення керування. Сучасні технології, що використовуються у каналах керування роботизованими системами, зазвичай спираються на фіксовані параметри зв'язку – визначений частотний діапазон, конкретний тип модуляції, постійну потужність сигналу. Це робить їх вразливими до впливу навіть низькопотужних адаптивних генераторів радіозавад. Особливо небезпечною є загроза застосування мобільних засобів придушення, зокрема дронів-джамерів, здатних створювати направлені або динамічні завади поблизу платформи-жертви.



У зв'язку з цим виникає потреба у реалізації принципово нових підходів до побудови каналів зв'язку, які були б здатні змінювати свої параметри в реальному часі – так зване спектральне маневрування. Такі підходи ґрунтуються на концепціях програмно визначеного радіо (Software Defined Radio, SDR) і когнітивного радіо (Cognitive Radio, CR), які забезпечують динамічну адаптацію параметрів радіоканалів керування до змін спектральної обстановки.

Постановка проблеми. Широке впровадження роботизованих платформ у таких сферах як транспортна логістика, охорона інфраструктури, моніторинг навколишнього середовища та правоохоронна діяльність – створює нові виклики для забезпечення надійності та безпеки систем керування. Одним з найвразливіших компонентів у таких системах є радіоканали керування, які можуть стати об'єктом навмисного або випадкового радіоелектронного втручання.

У практиці вже фіксуються випадки застосування портативних або мобільних генераторів завад зловмисниками з метою перешкоджання роботизованим системам, зокрема дронам, що виконують функції моніторингу, патрулювання або доставки вантажів. Такі пристрої здатні подавляти сигнали керування, телеметрії або навігації в діапазонах, що використовуються цивільними БПЛА, створюючи загрозу для безпечного функціонування автономної платформи.

Навіть за наявності кількох резервних каналів у межах одного частотного діапазону стійкість системи до активного радіопридушення залишається обмеженою. Це зумовлено тим, що всі альтернативні канали мають однакову фізичну доступність для засобів впливу та можуть бути одночасно пригнічені широкосмуговою або спеціально підбраною більш вузькосмуговою завадою. Застосування методів псевдовипадкового переналаштування робочої частоти (ППРЧ, або frequency hopping spread spectrum, FHSS) дійсно певною мірою ускладнює роботу засобів придушення, однак не гарантує захисту у випадках, коли зловмисник має змогу аналізувати характер стрибків частоти або використовує широкосмугові постановники завад з достатнім рівнем потужності. Крім того, ППРЧ зазвичай реалізується в межах фіксованого діапазону (наприклад, ISM-смуги), що створює передбачувану поверхню атаки. У результаті навіть системи з резервуванням каналів можуть бути вразливими до прицільного джамінгу, коли зловмисник точно знає (або визначив) частоту роботи цільової системи й навмисно її глушить.

Актуальність проблеми полягає в тому, що для ефективного забезпечення надійності каналів зв'язку в умовах потенційного впливу завад потрібно переходити від статичних схем до адаптивних рішень, які спроможні здійснювати спектральне маневрування – динамічну зміну параметрів сигналу (частоти, смуги, модуляції) в реальному часі. Такий підхід вимагає інтеграції принципів програмно-визначеного та когнітивного радіо, а також реалізації методів безперервного моніторингу радіообстановки й прийняття рішень у межах дозволених діапазонів частот.

Відсутність типових моделей адаптивного реагування на джамінг, недостатній рівень стандартизації в галузі CR/SDR для роботизованих систем, а також складність практичної реалізації спектрального маневрування на доступному обладнанні залишають цю задачу відкритою для подальших досліджень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика захисту радіоканалів керування автономних платформ активно досліджується впродовж останнього десятиліття, зокрема у зв'язку з поширенням технологій безпілотного керування в цивільному секторі. Одним із базових напрямів протидії навмисним радіозавадам є використання розширеного спектра (spread spectrum), зокрема псевдовипадкового



переналаштування робочої частоти (FHSS) та прямого розширення спектра (DSSS). Ці методи широко описані у працях з бездротового зв'язку [1], проте їх ефективність обмежується в межах одного частотного діапазону, що створює вразливість до широкосмугового придушення.

Із поширенням концепцій програмно визначеного радіо (SDR) та когнітивного радіо (CR) в системах керування автономними платформами з'явилася можливість побудови гнучких радіоканалів, здатних змінювати свої параметри в реальному часі. Одними з перших, хто системно обґрунтував архітектуру когнітивного радіо, були S. Haykin, який запропонував базову модель когнітивної взаємодії у спектрі [2], та J. Mitola, що сформував загальну архітектуру CR-систем із сенсором спектра, блоком прийняття рішень і адаптивним передавачем [3].

Окремі сучасні дослідження, зосереджені на застосуванні SDR/CR у безпілотних платформах, свідчать про те, що динамічне перемикання частоти, модуляційної схеми та ширини смуги пропускання дозволяє значно зменшити ймовірність втрати керування у випадку активного завадового впливу. Наприклад, у роботі A. Martian описано практичну реалізацію системи спектрального моніторингу на базі платформи USRP з використанням середовища GNU Radio, здатну працювати в реальному часі [4].

Водночас у відкритій літературі практично відсутні завершені моделі адаптивного спектрального маневрування, інтегровані з нормативними вимогами до використання частотного ресурсу. Більшість наявних підходів або орієнтовані на військові задачі, або не враховують нормативно-правових обмежень і вимог, які встановлюються державними або міжнародними органами щодо використання радіочастотного ресурсу в немілітаризованих (цивільних) сферах, а також не оптимізовані для впровадження на доступному SDR-обладнанні. Це формує актуальну нішу для прикладних досліджень у напрямку розробки адаптивних, нормативно допустимих та інфраструктурно нейтральних рішень для роботизованих систем, які функціонують у відкритому ефірному середовищі.

Метою статті є розробка методу спектрального маневрування для підвищення стійкості каналів керування роботизованими системами в умовах активного створення радіозавад, шляхом використання SDR/CR-платформ, алгоритмів спектрального аналізу та адаптивного перемикання частот.

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ДОСЛІДЖЕННЯ

У моделі на рис. 1 схематично зображено структуру радіоканалу керування (РКК) безпілотного літального апарата (БпЛА) в умовах впливу радіозавад від сучасного військового комплексу радіоелектронної боротьби. Це, так би мовити, наш «найгірший» сценарій, тому що інші засоби РЕБ матимуть значно простішу внутрішню архітектуру, а значить і менше можливостей надійно заглушити сигнал. Метою цієї моделі є вивчення поведінки каналу РКК під час придушення сигналу від пульта оператора (ПО). Передавач ПО генерує керуючий сигнал $s(t)$, який передається через канал зв'язку до приймача БпЛА. В каналі зв'язку присутні власні шуми середовища $n1(t)$, що додаються до сигналу. Крім того, у систему втручається завада $j(t)$, яка надходить від засобу РЕБ. Завада передається по каналу пригнічення, що забезпечує створення перешкод на частоті або у діапазоні дії сигналу $s(t)$. Таким чином, на вхід приймача БпЛА надходить сумарний сигнал:

$$x(t) = s(t) + j(t) + n1(t)$$

Для генерації завади, засіб РЕБ повинен отримати інформацію про характеристики сигналу керування. Це здійснюється за допомогою станції РРТР (радіо- та радіотехнічної розвідки), яка приймає сигнал $s(t)$, спотворений шумами $n_2(t)$, через канал розвідки. На основі прийнятого сигналу станція РРТР ідентифікує його параметри (наприклад, частоту, модуляцію, потужність) і передає їх до засобу РЕБ, який синтезує відповідну заваду $j(t)$.

Така модель дозволяє:

- моделювати ситуації з різними типами завад (широкопasmові, вузькопasmові, імпульсні);
- оцінювати вплив параметрів завади на ймовірність втрати зв'язку;
- вивчати вплив співвідношень сигнал/шум та сигнал/завада на точність прийому команд;
- розробляти стратегії адаптації системи керування БпЛА до умов РЕБ.

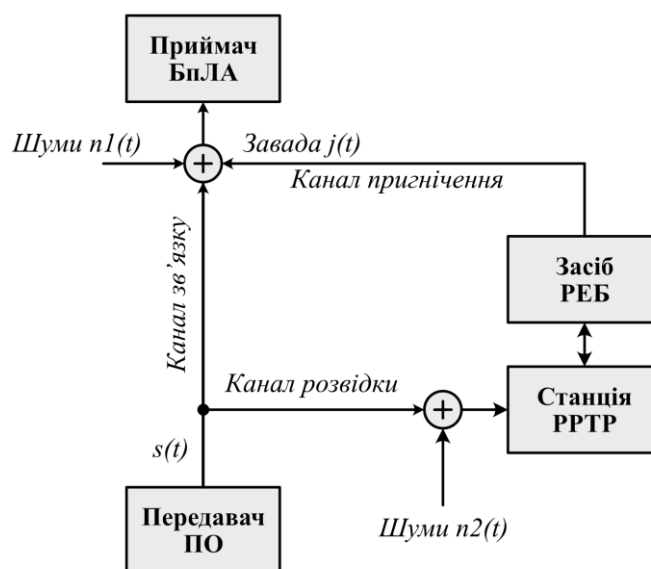


Рис.1. Схемне представлення моделі для дослідження характеристик РКК в умовах застосування засобу РЕБ

Для реалізації передавача і приймача РКК скористаємося програмним середовищем MATLAB. За основу візьмемо приклад передавача і приймача QPSK, введений в довідковій системі MATLAB, який ілюструє методи вирішення реальних проблем бездротового зв'язку, таких як зсув несучої частоти і фази в каналі зв'язку, відновлення синхронізації в приймачі й синхронізація кадрів (рис. 2). Ми імітуватимемо ефекти, характерні для радіоканалів зв'язку з об'єктами, що рухаються. Погіршуватимемо якість переданого сигналу за допомогою фазового та частотного зсуву, затримки, що змінюється в часі, для імітації зсуву синхронізації між передавачем та приймачем, а також додаванням білого гаусівського шуму AWGN.

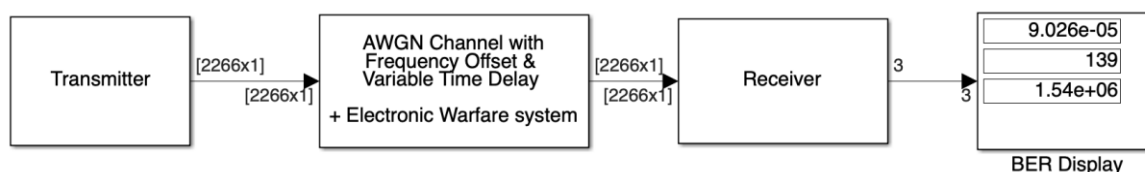


Рис.2. Схемне представлення моделі для дослідження характеристик РКК в умовах застосування засобу РЕБ, створене в середовищі MATLAB



Для забезпечення стабільного керування БпЛА в умовах активної протидії засобів РЕБ необхідно визначити мінімальну швидкість передачі даних у каналі керування, яка забезпечить своєчасну доставку команд і відповідей. Команди керування мають критичну затримку (RTT – Round Trip Time), яка не повинна перевищувати визначеного порогу для стабільного керування. Під затримкою матимемо на увазі час реакції системи на зміну умов каналу (виявлення завади й перемикавання частоти). Типові пакети команд керування невеликі (кілька десятків байтів), але передача повинна бути гарантовано надійною.

При моделюванні доцільним буде використання різних схем модуляції (наприклад, QPSK, 16-QAM) для оцінки їх ефективності в умовах завад. Мінімальна швидкість передачі даних залежатиме від вибору модуляції та доступної смуги пропускання. Передачу команд керування слід випробувати з різними швидкостями каналу, починаючи з низької швидкості й поступово збільшуючи її. Таким чином визначимо мінімальну швидкість, за якої усі команди передаються своєчасно, а втрати пакетів залишаються прийнятними.

Для розрахунку необхідної швидкості передачі даних в РКК, звернемо увагу на протокол MAVLink (Micro Air Vehicle Link) – це легкий, двійковий комунікаційний протокол, який використовується для обміну повідомленнями між БпЛА та наземними станціями керування. Параметри його каналу керування залежать від конкретної реалізації, однак можна виділити типові значення, що характерні для практичного використання MAVLink у системах БпЛА з обмеженим радіоресурсом. Довжина повідомлення складає від 8 до 263 байт (команди керування, телеметрія, діагностика зазвичай передаються в пакеті розміром 20 – 50 байт). Повідомлення можуть передаватись до 50 разів на секунду, в залежності від критичності потоку. Проаналізувавши типовий обсяг uplink-трафіку протоколу MAVLink дійшли до висновку, що в нашій моделі пропускної здатності до 20 кбіт/с є цілком достатньо для повноцінного uplink-каналу навіть при розширених функціях. Швидкість передачі символів нашої передавальної системи становитиме 50 тис. символів на секунду, а частота дискретизації після фільтра кореневого піднесеного косинусу (Raised Cosine Transmit Filter) – 100 тис. відліків на секунду.

Розроблена симуляційна модель дала змогу визначити критичні фактори, які впливають на ефективність передачі командного трафіку: швидкість передачі символів, смугу пропускання, частоту кадрів і структуру службових повідомлень.

Розроблюваний нами метод протидії засобам РЕБ використовуватиме певну фіксовану кількість радіоканалів N_{ch} з шириною смуги пропускання $bw_{ch}(t)$. Радіоканали знаходитимуться в різних частотних діапазонах від 400 МГц до 6 ГГц, що передбачатиме використання в трансиверах кількох антен на різні діапазони й антенних комутаторів. Для нашої моделі виберемо загальну кількість каналів $N_{ch} = 256$, хоча, за необхідності, їх кількість може бути суттєво збільшена.

Передбачається, що відповідальна особа, яка здійснює координацію експлуатації групи безпілотних літальних апаратів (БпЛА) у межах певної території, матиме апіорну інформацію щодо реального завантаження радіочастотного спектра в даному регіоні. Така інформація може включати відомості про частоти, які вже використовуються іншими операторами або системами (наприклад, службами спостереження, охоронними чи технологічними системами). Відповідальна особа (оператор-планувальник) на підставі цієї інформації формуватиме погоджену сітку частот для радіоканалів керування (РКК), беручи до уваги місцеві обмеження, фон завад і загальну спектральну обстановку.

Сітка радіоканалів може містити канали з різним рівнем пріоритету використання. Наприклад, у пріоритет можуть бути поставлені частоти, що є типовими для комерційних БпЛА – з метою забезпечення непомітності застосування спеціалізованих алгоритмів адаптації до завад. Натомість канали з менш сприятливими умовами (наприклад, ті, що частково перевантажені або перебувають у зоні можливих перешкод) можуть розглядатися як резервні або альтернативні. За певних обставин може розглядатися доцільність використання частотних діапазонів, що були раніше виділені під інші технологічні системи – наприклад, цифрове ефірне телебачення, за умови відсутності активного навантаження у відповідному діапазоні.

Перед введенням системи в експлуатацію оператор-планувальник здійснює попереднє програмування трансиверів БпЛА та пов'язаного програмного забезпечення, включаючи завантаження необхідних криптографічних алгоритмів, ключових даних і частотно-модуляційної сітки. Остання містить інформацію про центральні частоти кожного каналу та пріоритети використання. У ході цього процесу формується тривимірний масив *Inst*, де:

n_{ch} (від 0 до $N_{ch}-1$) – порядковий номер радіоканалу;

$freq_{ch}$ – відповідна центральна частота (у Гц);

$prior_{ch}$ – пріоритет використання каналу.

Такий масив може бути візуалізований як таблиця або графічна структура, яка відображає спектральний розподіл та логіку вибору каналів залежно від умов. На графіку (рис. 3) суміщено пріоритети каналів зв'язку з частотними діапазонами, які перекриваються дією типового «окопного» РЕБ-засобу з кількома фіксованими смугами завад. Це дозволяє наочно оцінити, які канали потрапляють під потенційне глушіння, та використовувати ці дані для динамічного блокування або зниження пріоритету каналів у зоні впливу РЕБ. Такий підхід є основою для побудови адаптивного алгоритму перемикавання частот у БпЛА.

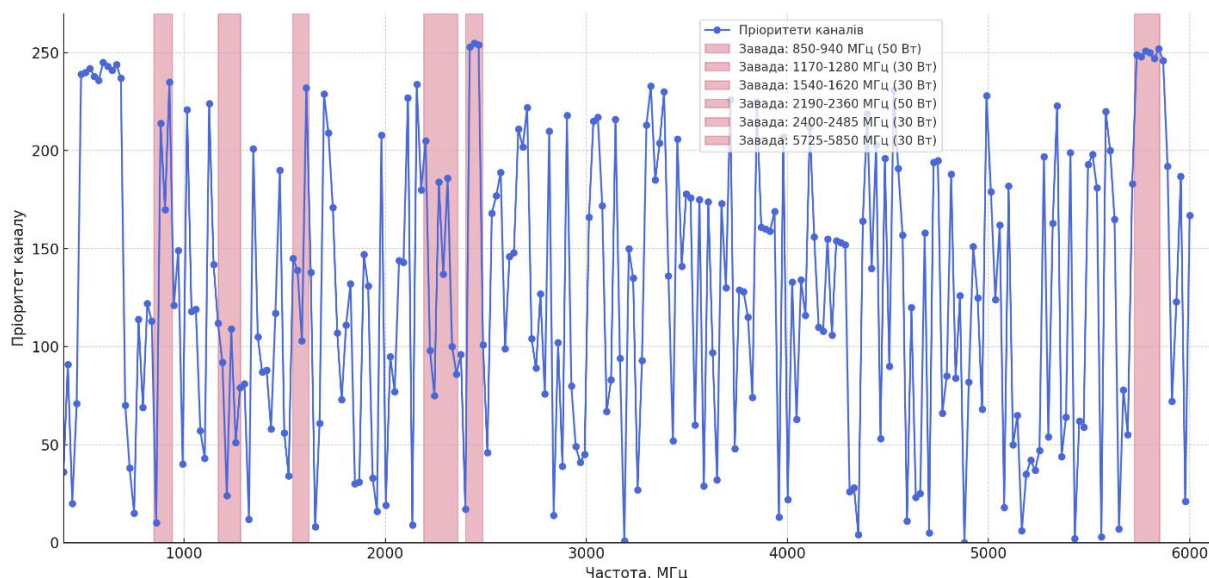


Рис.3. Суміщення пріоритетів каналів зв'язку з діапазонами РЕБ-завад

На схемі (рис. 4) відображено алгоритм аналізу помилок передачі на рівнях бітів, повідомлень і кадрів. На початковому етапі виконується побітове порівняння переданого та прийнятого бітових векторів ($txBits$ і $rxBits$), на основі чого визначається масив бітових

помилки $e_{\{m,k\}}$. Далі обчислюються показники ймовірності бітової помилки (BER), помилковості повідомлень ($msgHasError$), помилковості кадрів ($frameHasError$), ймовірності помилки повідомлення (PER_msg) і ймовірності правильного прийому (Pol_msg). Інтегральні показники PER_frame та Pol_frame узагальнюють інформацію на рівні всієї серії кадрів. Такий підхід дозволяє гнучко оцінювати надійність каналу в умовах дії завад і є основою для адаптивного вибору параметрів спектрального маневрування в SDR/CR-системах.

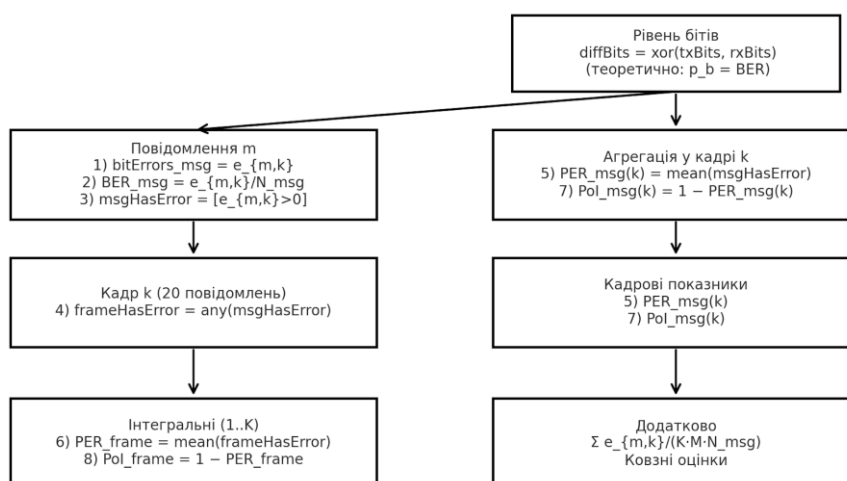


Рис.4. Схема багаторівневої оцінки якості прийому повідомлень у каналі зв'язку

Плата USRP B200 mini (рис. 5) виробництва Ettus Research є компактною повнофункціональною SDR-платформою з одним приймально-передавальним трактом. Ця плата орієнтована на бортове використання – завдяки малій масі та споживанню, її доцільно вбудовувати безпосередньо в корпус БПЛА, де вона працює як частина трансивера керування. Робота USRP B200 mini вимагає наявності хост-комп'ютера або вбудованого процесора, який:

- здійснює програмне керування частотою, смугою, рівнем сигналу тощо;
- приймає потік IQ-семплів (вектори комплексних чисел), які використовуються для демодуляції сигналів або аналізу спектра;
- реалізує алгоритми прийняття рішень (виявлення завади, блокування каналу, перемикання).

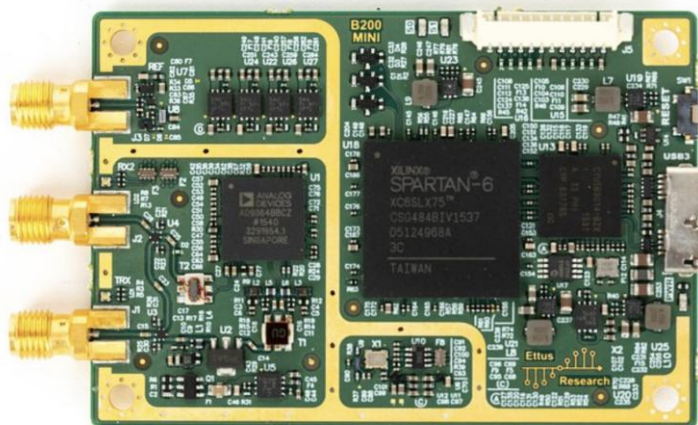


Рис. 5. – Зовнішній вигляд плати USRP B200mini

Таким чином, вся логіка алгоритмів реалізується на рівні хост-процесора, тоді як B200 mini є лише фронтом перетворення сигналів у радіоефірі. Основною особливістю реалізації алгоритмів на USRP B200 mini є те, що одночасна передача і прийом неможливі для різних частот.

МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

З метою дослідження ефективності адаптивного спектрального маневрування в умовах впливу завад було побудовано імітаційну модель системи передачі даних у середовищі MATLAB із використанням SDR-архітектури. Структура моделі охоплює п'ять основних функціональних підсистем: підсистему передавання (Tx), підсистему каналу (Channel), підсистему приймання (Rx), підсистему моніторингу спектра та аналізу завад (Monitoring and EW Analysis), а також ядро адаптивного керування (Adaptive Control Core).

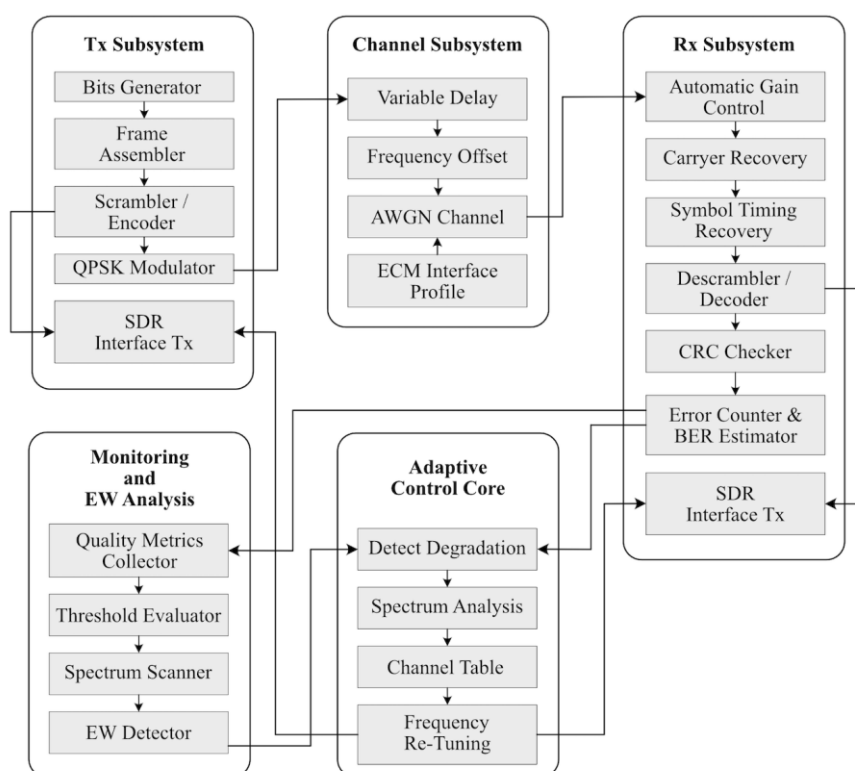


Рис. 6. – Структура імітаційної моделі адаптивного РКК

1) Підсистема передавання (Tx Subsystem) відповідає за формування та попередню обробку бітової інформації. Вона включає генератор бітів, блок формування кадрів, скремблер/енкодер, QPSK-модулятор і SDR-інтерфейс передавача.

2) Підсистема каналу (Channel Subsystem) моделює ефекти впливу середовища передачі, зокрема змінну затримку (Variable Delay), частотний зсув (Frequency Offset), адитивні гаусівські завади (AWGN) та профіль радіоелектронного впливу (ECM Interface Profile), який може включати сценарії динамічного або цільового придушення.

3) Підсистема приймання (Rx Subsystem) реалізує класичний тракт приймання сигналу: автоматичне регулювання підсилення (AGC), відновлення несучої, відновлення

часової синхронізації, декодування, перевірку CRC (Cyclic Redundancy Check) та оцінку кількості помилок і BER. Також реалізовано SDR-інтерфейс для приймального модуля.

4) Підсистема моніторингу та аналізу завад (Monitoring and EW Analysis) виконує безперервне сканування спектра, виявлення ознак завад, оцінку порогових перевищень, збір показників якості та передавання їх у блок адаптивного реагування. Вона є джерелом даних для прийняття рішень щодо зміни параметрів РКК.

5) Адаптивне керуюче ядро (Adaptive Control Core) відповідає за виявлення погіршення якості зв'язку (Detect Degradation), спектральний аналіз, формування таблиці доступних каналів та перебудову робочої частоти (Frequency Re-Tuning). В основі алгоритмів лежить принцип когнітивного радіо: система динамічно обирає новий канал із урахуванням спектральної обстановки, історії завад і пріоритетів частот.

Зв'язки між підсистемами забезпечують зворотний зв'язок між фізичним трактом і системою адаптації. Це дозволяє здійснювати оперативну реакцію на зміну завадової ситуації в ефірі з мінімальною затримкою, зберігаючи надійність каналу керування.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

У рамках побудованої імітаційної моделі було послідовно сформовано три сценарії, які відрізнялися рівнем складності та поведінкою засобу РЕБ. Кожен сценарій мав на меті відтворити характерні умови протидії в різних тактичних ситуаціях та оцінити реакцію адаптивного радіоканалу керування безпілотною літальною апарата.

На першому етапі моделювання розглядався адаптивний режим роботи каналу, коли засіб РЕБ здатний швидко перебудовуватися на робочу частоту пульта оператора. Час реакції РЕБ у цьому сценарії становив 40 мс, що імітує умови активного «переслідування» частоти керування (рис. 7). У цьому режимі моделюється ситуація, коли противник постійно сканує спектр і намагається миттєво глушити будь-яку частоту, яку використовує система керування БпЛА. Основна мета цього сценарію полягає у перевірці стійкості алгоритму частотного перестроювання під час високої динаміки змін у спектрі, коли кожна нова частота може бути майже негайно виявлена та заглушена.

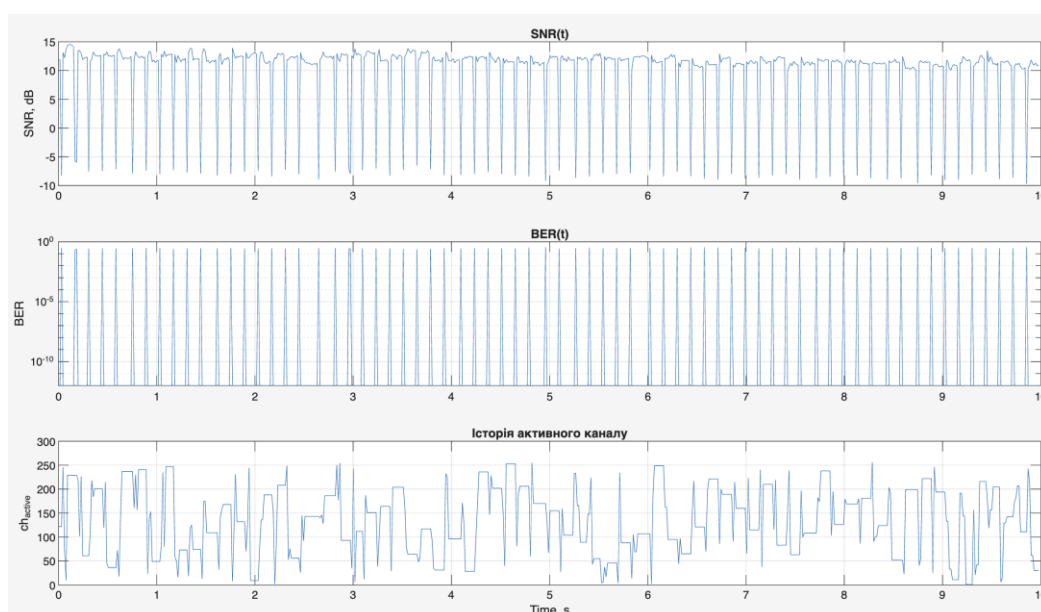


Рис. 7. – Часова діаграма роботи адаптивної системи керування радіоканалом БпЛА (час реагування засобу РЕБ – 40 мс)

На другому етапі модель було наділено більшою реалістичністю, щоб урахувати ефект «пам'яті» засобу РЕБ. Передбачено два часові параметри реакції:

– при появі нової частоти, раніше невідомої засобу РЕБ, час переналаштування становить 800 мс;

– при повторному виявленні відомої частоти, яка вже збережена у пам'яті, – 40 мс.

Такий сценарій відображає більш реалістичну роботу сучасних систем РЕБ, які накопичують інформацію про частотні «сліди» ворожих сигналів та реагують на них із різною швидкістю. У межах цього етапу моделюється поступове розширення бази відомих частот і зростання ефективності глушіння у міру тривалості експозиції сигналу керування (рис. 8). Особлива увага приділяється реакції адаптивного модуля у моменти, коли РЕБ переходить із фази пошуку до фази «переслідування» відомих частот.

Для аналізу динаміки стійкості каналу доцільно використовувати *інтегральний BER*, який характеризує накопичену частку помилкових бітів за весь проміжок часу симуляції. Цей параметр визначається як:

$$BER_{int}(t) = \frac{\sum_{i=1}^t N_{err}(i)}{\sum_{i=1}^t N_{total}(i)},$$

де $N_{err}(i)$ – кількість помилкових бітів у кадрі, а $N_{total}(i)$ – загальна кількість переданих бітів у кадрі.

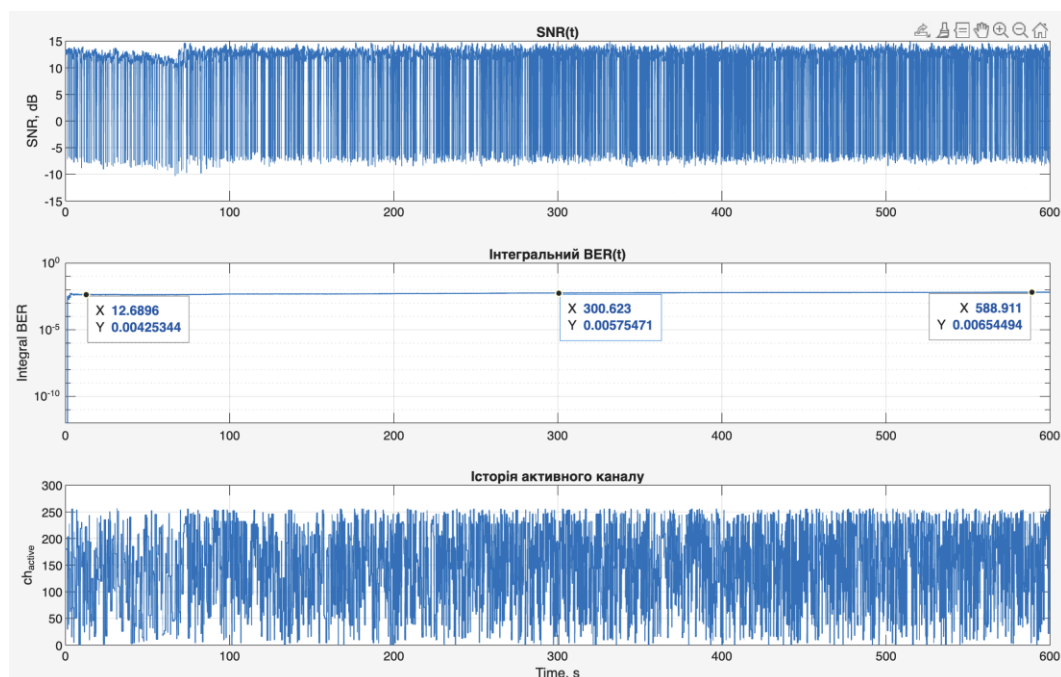


Рис. 8. – Часова діаграма роботи адаптивної системи з графіком інтегрального BER

Інтегральний BER є усередненим показником, який не реагує на короточасні сплески BER, викликані моментами глушіння. У системі, де канал постійно переходить між станами «добрий» і «поганий» (модель *bursty errors*), миттєвий BER коливається від майже нуля до одиниці, що робить його непридатним для оцінки загальної ефективності. *Інтегральний BER*, навпаки, відображає середню якість зв'язку, накопичену в часі, і дозволяє виявити повільні тенденції деградації системи – наприклад, поступове збільшення кількості відомих частот у пам'яті РЕБ.

У реальному середовищі БпЛА зв'язок не є миттєвим процесом, а триває хвилини чи години. Саме інтегральний BER відображає, як система поводить себе на часовому інтервалі, достатньому для накопичення ефектів глушіння. На графіку (рис. 8) видно, що інтегральний BER зростає повільно, з $\approx 4 \cdot 10^{-3}$ до $\approx 6 \cdot 10^{-3}$ протягом 600 секунд. Це зростання відображає фізичний процес «навчання» РЕБ, коли з часом зменшується кількість повністю невідомих частот, а отже, частіше виникають короткі, але ефективні інтервали глушіння.

Інтегральний BER показує не миттєвний стан каналу, а накопичену ефективність системи передачі. У той час як миттєвий BER може різко коливатися навіть у стабільно працюючій системі, інтегральний BER дозволяє:

- кількісно визначити частку втраченої інформації за весь період моделювання;
- оцінити вплив тривалого впливу РЕБ на загальну надійність каналу;
- порівнювати різні алгоритми адаптації за єдиним інтегральним критерієм.

Для прикладу, якщо після 600 секунд інтегральний $BER = 0,0065$, це означає, що лише 0.65 % усіх бітів, переданих системою, були пошкоджені – тобто канал зберіг 99,35 % інформаційної цілісності, незважаючи на активну роботу РЕБ.

Третій сценарій (рис. 9) призначено для порівняння адаптивного та неадаптивного (статичного) режимів роботи при входженні БпЛА в зону дії окопного засобу РЕБ із фіксованими смугами випромінювання. У цьому випадку моделюється ситуація, коли РЕБ залишається активним постійно, без переслідування, але з високою потужністю випромінювання у кількох діапазонах. На сотій секунді симуляції передбачено момент активації РЕБ, після чого канал зв'язку потрапляє під дію завад у своїй робочій смузі.

Для обох варіантів (адаптивного та статичного) використовуються однакові початкові умови, що дозволяє виконати коректне порівняння ефективності збереження зв'язку, швидкості реакції системи та накопичення помилок під впливом завад.

Це дозволяє простежити еволюцію реакції системи керування від умов постійного динамічного переслідування до ситуації раптової появи потужних фіксованих завад і створює базу для подальшого аналізу отриманих часових залежностей $SNR(t)$, $BER(t)$ та інтегрального $BER_{int}(t)$.

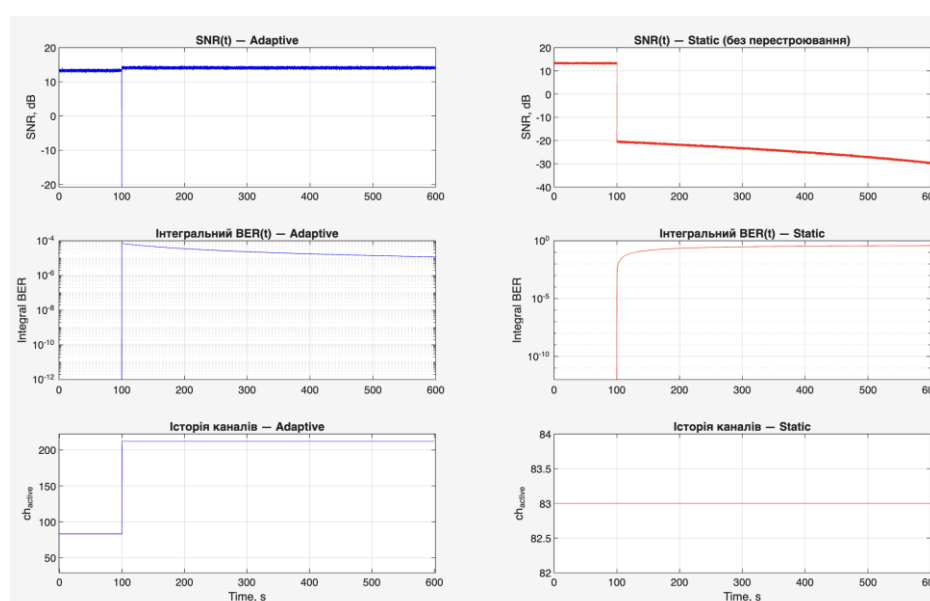


Рис. 9. – Порівняння роботи РКК з адаптивною системою керування та РКК із фіксованим (статичним) вибором робочої частоти



Результати моделювання підтверджують ефективність адаптивного спектрального маневрування в умовах радіозавад. У випадку адаптивного режиму (ліворуч), після фіксації різкого падіння SNR на 100-й секунді, система виконує перебудову частоти (див. “Історія каналів – Adaptive”), що дозволяє швидко відновити рівень SNR на стабільному рівні (~ 13 дБ). В результаті інтегральна ймовірність бітової помилки BER залишається нижче 10^{-5} , що свідчить про високу завадостійкість каналу.

Натомість у статичному режимі (праворуч), у якому перебудова частоти не передбачена, зниження SNR призводить до стрімкого зростання BER – до значень, що унеможливають коректний прийом. Значення інтегрального BER перевищує 10^{-1} , тобто помилки виникають у більшості повідомлень.

Таким чином, запропонована адаптивна система демонструє здатність ефективно виявляти погіршення якості зв’язку та своєчасно перемикатись на більш сприятливі канали, зберігаючи працездатність РКК у завадовому середовищі.

ВИСНОВКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

У статті розглянуто підхід до підвищення завадостійкості радіоканалів керування роботизованими комплексами шляхом реалізації механізму адаптивного спектрального маневрування на базі технологій SDR і когнітивного радіо. Запропонована модель враховує зміну радіообстановки, виявлення деградації якості сигналу, автоматичне перемикання на альтернативні частоти з попередньо погодженої сітки каналів, а також застосування критеріїв вибору з урахуванням історії використання, SNR та інтегрального BER .

Результати імітаційного моделювання підтверджують, що за наявності активного радіопридушення система з адаптивним керуванням забезпечує стабільний рівень SNR і суттєво нижчі значення BER порівняно зі статично налаштованими каналами. Це свідчить про доцільність впровадження когнітивних механізмів у системах дистанційного керування автономними платформами, зокрема в логістиці, моніторингових системах, охороні об’єктів та діяльності правоохоронних структур.

У подальших дослідженнях планується:

– удосконалення алгоритмів прогнозування завадової обстановки з використанням методів машинного навчання;

– розширення системи на багатоканальну архітектуру з підтримкою роїв БпЛА;

– апробація моделі у натурних випробуваннях із реальними SDR-пристроями;

Загалом отримані результати створюють підґрунтя для подальшої розробки захищених каналів зв’язку нового покоління для автономних роботизованих систем у відкритому радіоефірі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Vasylenko, S. V. (2016). *Systems of radio communication with pseudo-random frequency hopping*. Problems of Telecommunications, 1(18), 91–100. <http://pt.journal.kh.ua>
2. Haykin, S. (2005). Cognitive radio: Brain-empowered wireless communications. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 23(2), 201–220. <https://doi.org/10.1109/JSAC.2004.839380>
3. Mitola, J. (2006). *Cognitive radio architecture: The engineering foundations of radio XML*. Wiley.
4. Martian, A. (2014). Real-time spectrum sensor based on USRP. In *Proceedings of the 10th International Conference on Communications (COMM)* (pp. 1–4). <https://doi.org/10.1109/ICComm.2014.6866728>
5. *Software defined cognitive radio using Matlab*. (n.d.). <https://www.scribd.com/doc/103610191/Cognitive-Radio>



6. Banerjee, J. S., & Karmakar, K. (2012). A comparative study on cognitive radio implementation issues. *International Journal of Computer Applications*, 45(15).
7. GNU Radio. (2023, July 17). *Usage manual – GNU Radio*.
https://wiki.gnuradio.org/index.php?title=Usage_Manual
8. Valieva, I. (2020). *Spectrum sensing for dynamic spectrum access in cognitive radio*. E-Print AB.
9. Raschella, A., & Umbert, A. (2015). Implementation of cognitive radio networks to evaluate spectrum management strategies in real time. *Computer Communications*.
<https://doi.org/10.1016/j.comcom.2015.11.009>

**Serhii Semendiai**

Graduate student

Chernihiv Polytechnic National University, Chernihiv, Ukraine

ORCID: 0000-0002-7751-5956

serhii_semendiai@icloud.com

ADAPTIVE SPECTRAL MANEUVERING IN CONTROL SYSTEMS OF ROBOTIC COMPLEXES UNDER ELECTRONIC WARFARE CONDITIONS

Abstract. The article presents an approach to enhancing the interference resistance of control radio channels for robotic systems under conditions of active electromagnetic disruption by introducing a mechanism of adaptive spectral maneuvering. The proposed simulation model is implemented on an SDR-based platform and incorporates elements of cognitive spectrum analysis, enabling dynamic adjustment of signal frequency-time parameters in response to deteriorating radio conditions. The model includes modules for spectrum monitoring, interference detection, channel quality evaluation (BER, SNR), and an adaptive frequency control unit. Simulation results demonstrate a significant reduction in error probability and sustained system operability compared to statically configured channels. The proposed solution is applicable in logistics, technical monitoring, and unmanned surveillance systems, particularly in environments with intentionally congested spectrum.

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

REFERENCES

1. Vasylenko, S. V. (2016). *Systems of radio communication with pseudo-random frequency hopping*. Problems of Telecommunications, 1(18), 91–100. <http://pt.journal.kh.ua>
2. Haykin, S. (2005). Cognitive radio: Brain-empowered wireless communications. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 23(2), 201–220. <https://doi.org/10.1109/JSAC.2004.839380>
3. Mitola, J. (2006). *Cognitive radio architecture: The engineering foundations of radio XML*. Wiley.
4. Martian, A. (2014). Real-time spectrum sensor based on USRP. In *Proceedings of the 10th International Conference on Communications (COMM)* (pp. 1–4). <https://doi.org/10.1109/ICComm.2014.6866728>
5. *Software defined cognitive radio using Matlab*. (n.d.). <https://www.scribd.com/doc/103610191/Cognitive-Radio>
6. Banerjee, J. S., & Karmakar, K. (2012). A comparative study on cognitive radio implementation issues. *International Journal of Computer Applications*, 45(15).
7. GNU Radio. (2023, July 17). *Usage manual – GNU Radio*. https://wiki.gnuradio.org/index.php?title=Usage_Manual
8. Valieva, I. (2020). *Spectrum sensing for dynamic spectrum access in cognitive radio*. E-Print AB.
9. Raschella, A., & Umbert, A. (2015). Implementation of cognitive radio networks to evaluate spectrum management strategies in real time. *Computer Communications*. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2015.11.009>



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