

Сергій Семендяй

аспірант

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: serhii_semendiai@icloud.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7751-5956>**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ БЕЗПРОВОДОВИХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ В УМОВАХ ЗАСТОСУВАННЯ ЗАСОБІВ РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ БОРОТЬБИ**

У статті розглянуто деякі технології, що забезпечують автономність безпілотних літальних апаратів (БпЛА) на полі бою, методи підвищення ефективності каналів зв'язку БпЛА в умовах застосування засобів радіоелектронної боротьби (РЕБ). Також розглянута розробка тестової моделі каналу зв'язку бездротових засобів передачі даних (БЗПД), призначена для відпрацювання технологій протидії засобам радіоелектронної боротьби (РЕБ) та навчання нейронної мережі.

Стаття присвячена проблемам створення методів та моделей, що використовують технології програмно визначеного радіо (SDR), когнітивного радіо та багаторівневу параметричну адаптацію кодових конструкцій турбокоду за допомогою штучного інтелекту для підвищення ефективності безпроводових систем передачі даних в умовах активного застосування засобів радіоелектронної боротьби через забезпечення достовірності інформації.

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

Рис.: 2. Бібл.: 8.

Актуальність теми дослідження. Розроблення БпЛА, здатних працювати на полі бою без спеціально навченого обслуговуючого персоналу, має перспективи, і такі системи вже розробляються і тестуються в різних країнах світу.

Однією з основних тенденцій у розвитку БпЛА є збільшення автономності та зменшення необхідності в присутності оператора на місці. На сьогодні вже є БпЛА, які можуть виконувати певні завдання без оператора або з мінімальною його участю. Наприклад, деякі БпЛА можуть знаходити та розпізнавати об'єкти, планувати маршрути, здійснювати посадку та заряджання без допомоги людини.

Однак нині технології, що забезпечують повну автономність БпЛА на полі бою, все ще потребують подальшого розвитку та вдосконалення, особливо щодо рівня штучного інтелекту та машинного навчання, необхідного для того, щоб БпЛА могли приймати правильні рішення в мінливих умовах бойових дій.

Постановка проблеми. Розробка безпілотних літальних апаратів (БпЛА), здатних працювати на полі бою без спеціально навченого обслуговуючого персоналу, є досить перспективним напрямом конструювання. Такі БпЛА можуть виконувати широкий спектр завдань, включаючи розвідку, моніторинг, наведення вогню та інші функції, що раніше виконувалися людиною вручну.

У цій сфері активно розвиваються технології автономної навігації, штучного інтелекту та машинного навчання, що дає можливість БпЛА здійснювати складні задачі без прямого втручання з боку людини. Наприклад, розробники можуть створювати системи, що дозволяють БпЛА автоматично виявляти й розпізнавати об'єкти на землі, такі як техніка, будівлі тощо.

Проте важливо зазначити, що такі системи повинні бути досить надійними, безпечними та забезпечувати достатній рівень точності, щоб вони могли бути використані на полі бою. Крім того, важливими аспектами при розробці БпЛА для використання на полі бою є забезпечення безпеки та конфіденційності даних, зокрема даних керування та інформації про місцезнаходження.

Виробники безпілотних літальних апаратів висувають певні специфічні вимоги до радіоелектронного обладнання з метою забезпечення надійності та стабільності роботи системи зв'язку. Основні вимоги включають таке:

- радіообладнання повинно бути енергоефективним, щоб забезпечити тривалий час польоту БПЛА;
- система зв'язку повинна мати високу чутливість для забезпечення якісного зв'язку на великій відстані;
- радіообладнання повинне підтримувати роботу у широкому діапазоні частот для забезпечення гнучкості вибору каналів зв'язку;
- радіообладнання повинне бути захищеним від зовнішніх електромагнітних завад та не впливати на роботу інших електронних приладів на борту БПЛА;
- зв'язок повинен забезпечувати достатню швидкість передачі даних для реалізації завдань, пов'язаних з розвідкою, спостереженням, а також для керування БПЛА;
- радіообладнання повинне забезпечувати високу достовірність передачі даних для забезпечення якісного відеозв'язку, а також інформації про точне місцезнаходження БПЛА;
- радіообладнання повинне бути сумісним з іншими елементами БПЛА, такими як датчики, навігаційні системи, системи стабілізації, щоб забезпечити їх спільну роботу.

Діапазон радіочастот, що використовується для БПЛА, може різнитись залежно від конкретної моделі і її призначення. Зазвичай БПЛА використовують частотний діапазон від 900 МГц до 5,8 ГГц, який забезпечує достатню швидкість передачі даних і надійне з'єднання між пультом управління та БПЛА.

Для безпеки в повітрі й уникнення перебоїв у роботі інших систем радіозв'язку, у багатьох країнах є обмеження на використання певних діапазонів радіочастот для БПЛА. Наприклад, у США і Канаді для комерційного використання БПЛА дозволено використовувати лише діапазони 900 МГц, 2,4 ГГц і 5,8 ГГц. У Європі та більшості країн Азії дозволені діапазони частот від 433 МГц до 5,8 ГГц.

При виборі частотного діапазону для БПЛА необхідно враховувати рівень завад від інших пристроїв, що працюють у цьому діапазоні, а також максимальну відстань і стабільність зв'язку, які можна забезпечити в цьому діапазоні.

Слід також враховувати, що противник вестиме постійну боротьбу з БПЛА. Застосування засобів радіоелектронної боротьби (РЕБ) може посилити ефективність боротьби з безпілотними літальними апаратами, особливо якщо вони використовують радіоканали для комунікації з оператором. Засоби РЕБ можуть використовуватися для розриву зв'язку між БПЛА та оператором, перешкоджати роботі GPS-навігації та інших сенсорів, а також вносити завади в передачу сигналів та здійснювати інші різноманітні впливи на роботу безпілота.

Однак наявність засобів РЕБ не завжди гарантує успіх в боротьбі з БПЛА. Наприклад, деякі БПЛА можуть бути оснащені системами захисту від РЕБ та можуть використовувати криптографічні методи для захисту своїх комунікаційних каналів. Крім того, засоби РЕБ можуть використовуватися в обмеженому радіусі дії та бути не здатними підібрати свої параметри до специфіки кожного окремого випадку застосування БПЛА.

Засоби й технології РЕБ постійно розвиваються, щоб забезпечити військову перевагу в електронному бою. Ворог використовує різноманітні засоби радіоелектронної боротьби, які призначені для перешкоджання діям або знищення робототехніки, включаючи БПЛА. Для прикладу розглянемо комплекс РЕБ «Автобаза-М», який є одним з найбільш потужних засобів РЕБ в арсеналі ворожої армії [5]. Основні характеристики комплексу включають:

- діапазон частот: від 20 МГц до 18 ГГц;
- чутливість: не гірше 2 мкВ;
- селективність: не гірше 30 дБ;
- максимальна потужність виходу: до 50 Вт;
- максимальна дальність дії: до 200 км;
- кількість каналів: до 32;
- час розгортання: менше 5 хвилин;

- можливість роботи в автоматичному і напівавтоматичному режимах;
- можливість використовувати різні типи антен, включаючи направлені й широко-смугові.

Комплекс «Автобаза-М» може працювати як окремий засіб РЕБ, або в складі комплексів залпової артилерії, систем ППО та інших засобів радіоелектронного захисту. Він забезпечує ефективний захист від різноманітних БпЛА, радіоелектронної розвідки та інших засобів, що працюють у широкому діапазоні частот.

Протистояння між виробниками засобів зв'язку для БпЛА та виробниками засобів РЕБ є постійним процесом, що спонукає до постійних інновацій та вдосконалення технологій. Виробники засобів зв'язку стараються зробити свої системи якомога більш стійкими до завад та забезпечити найвищу якість передачі даних, у той час як виробники засобів РЕБ намагаються розробити нові технології, щоб забезпечити надійне блокування передачі даних.

Однак нині спостерігається тенденція до вирішення виробниками засобів зв'язку цієї задачі протистояння шляхом використання технології когнітивного радіо. Ця технологія дозволяє раціонально використовувати радіочастотний спектр та швидко переключатися між різними діапазонами, змінювати частоти або напрямок передачі сигналу, що зменшує вплив завад та забезпечує більш надійну передачу даних.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Когнітивне радіо було розроблено порівняно недавно, у 1990-х роках, як рішення на проблему ефективного використання радіочастотного спектра.

З появою бездротових технологій, використання радіочастотного спектра значно збільшилося, що призвело до проблеми перенасиченості радіочастотного спектра та збільшення взаємовпливу між бездротовими системами. Когнітивне радіо було розроблено для того, щоб забезпечити ефективне використання радіочастотного спектра, шляхом дозволу бездротовим пристроям виявляти та використовувати вільні радіочастотні діапазони, які не використовуються іншими пристроями в певний час у цьому місці.

Основна ідея когнітивного радіо полягає в тому, що бездротові пристрої можуть обстежувати радіочастотний спектр та аналізувати його в режимі реального часу. На основі зібраних даних про наявні радіочастотні діапазони, бездротовий пристрій може приймати рішення щодо використання вільного спектрального діапазону, оптимальних параметрів передачі та інших характеристик бездротової мережі. Застосування когнітивного радіо дозволяє забезпечити ефективне використання радіочастотного спектра, підвищити продуктивність та покращити якість передачі даних в бездротових мережах. Застосування когнітивного радіо не обмежується лише бездротовими мережами, його можна використовувати в багатьох інших сферах, таких як медична діагностика, дистанційне керування, телекомунікаційна індустрія тощо.

Розробка технологій когнітивного радіо є активним напрямом досліджень та розробок у сфері бездротових комунікацій та радіоелектроніки, і багато компаній та наукових груп займаються її вдосконаленням та застосуванням у різних сферах. Деякі з провідних компаній, що займаються розробкою технологій когнітивного радіо, включають такі компанії, як Nokia, Samsung, Huawei, Ericsson, Intel, Microsoft та Qualcomm. Крім того, існують також спеціалізовані компанії, що розробляють бездротові технології та когнітивне радіо, наприклад, Cognitive Radio Technologies, xG Technology та інші. Багато університетів та дослідницьких центрів також займаються розробкою технологій когнітивного радіо – це університети Парижа й Каліфорнії, Массачусетський технологічний інститут (MIT) у США.

Протягом багатьох років дослідженням та розробкою технологій когнітивного радіо займаються індійські вчені. Деякі з найважливіших досягнень індійських учених у цій галузі включають:

- розробку технології когнітивного радіо, яка може працювати в широкому діапазоні частот, включаючи частотні діапазони, які не використовуються для комунікаційних потреб, тому ця технологія може бути використана для забезпечення безпеки та відновлення зв'язку у разі аварій або катастроф;

- використання когнітивного радіо для сучасних систем мобільного зв'язку – розробка технологій когнітивного радіо, які можуть бути використані для оптимізації використання смуги пропускання та збільшення кількості користувачів, що можуть бути обслуговані мобільними мережами;

- розробка нових методів спектрального спостереження, які дозволяють ефективно визначати наявність вільних частотних діапазонів та відслідковувати зміни в спектрі сигналів на різних частотах;

- розробка технології когнітивного радіо, яка може бути використана для моніторингу навколишнього середовища.

Індійські вчені також працюють над розробкою когнітивних радіоприймачів, які можуть приймати сигнали від різних джерел та відновлювати дані, навіть якщо вони пошкоджені або спотворені [3]. Це може бути корисно для роботів-дослідників та БпЛА, які працюють у важких умовах. Індійська компанія Saankhya Labs представила чіп Pruthvi, який може працювати з широкосмуговими радіочастотами в діапазоні від 70 МГц до 6 ГГц. Цей чіп здатен опрацьовувати сигнали в режимі реального часу та пристосовуватися до різних умов передачі, що робить його ідеальним для застосування в когнітивних радіосистемах [6]. Крім того, індійська компанія Cognitive Systems Private Limited розробляє когнітивні радіосистеми для різних застосувань, включаючи телекомунікації та безпеку. Їхні технології вже застосовуються в інтернеті речей та системах віддаленого керування.

Також в Індії було створено Національний інститут технічних досліджень, який займається дослідженнями в області когнітивного радіо та бездротових мереж. Учені цього інституту розробляють нові алгоритми та протоколи для когнітивного радіо, що сприятиме подальшому розвитку цієї технології.

Когнітивне радіо може знайти застосування в різних аспектах функціонування БпЛА, наприклад:

- управління спектром – БпЛА, що оснащені когнітивним радіо, можуть використовувати незайняті діапазони радіочастотного спектра для передачі і отримання інформації. Когнітивне радіо може виявляти доступні діапазони спектра, визначати канали з найменшими завадами й використовувати їх для передачі даних;

- розвідка і нагляд – БпЛА з когнітивним радіо можуть використовувати додаткові засоби зв'язку, які забезпечують кращу якість передачі даних. Когнітивне радіо може автоматично переключатись між різними каналами, щоб забезпечити максимальну швидкість передачі даних при мінімальних радіозавадах;

- система навігації – БпЛА з когнітивним радіо можуть використовувати сигнали GPS, щоб визначати своє місцезнаходження. Когнітивне радіо може виявляти завади в сигналах GPS і коригувати маршрут БпЛА відповідно;

- пошук і рятування – БпЛА з когнітивним радіо можуть бути використані для пошуку загиблих під час катастроф і для надання першої допомоги на місці подій. Когнітивне радіо може виявляти діапазони радіочастотного спектра, які використовуються для екстрених викликів і коригувати маршрут БпЛА відповідно;

- автономне стеження – БпЛА з когнітивним радіо можуть стежити за мобільними пристроями, що мають підключення до мережі, і аналізувати їх рух і поведінку.

Одним із прикладів використання когнітивного радіо в БпЛА є програма DARPA Adaptive RF Technology (ART) Program. Ця програма використовує SDR-радіо та когнітивні технології для автоматичного визначення найбільш ефективних частот для передачі та прийому сигналів на БпЛА. До складу ART також входить система Rapidly Deployable Radio (RaDR), що дозволяє швидко встановлювати засоби зв'язку та РЕБ на БпЛА й забезпечувати максимальну ефективність передачі та прийому сигналів.

Інший приклад використання когнітивного радіо в БпЛА – система Intra-Drone Communication (IDC) від компанії SkySafe. Ця система використовує когнітивні технології для автоматичного визначення найбезпечнішого каналу зв'язку між різними БпЛА у повітрі та забезпечення між ними безпечної передачі даних.

Крім того, когнітивне радіо може використовуватись для автоматичного визначення заборонених зон злітно-посадкових майданчиків та автоматичного перехоплення та знищення БпЛА, що порушують ці зони.

Програма DARPA ART була створена з метою розробки інтелектуальних радіоелектронних пристроїв, які забезпечують використання доступних каналів зв'язку, включаючи ті, які не використовуються в цей момент часу, і зменшують вплив завад та інших ефектів на якість зв'язку. Програма складається з кількох етапів дослідження та розробки, і на сьогодні було розроблено кілька прототипів інтелектуальних радіоелектронних пристроїв, які можуть працювати в умовах впливу шумів, навмисних завад і інших чинників. Деякі з подробиць використання програми DARPA ART в БпЛА включають:

- адаптивне керування енергією – програмне забезпечення DARPA ART може змінювати потужність випромінювання радіохвиль для забезпечення максимальної ефективності використання каналу зв'язку;

- аналіз спектра – система використовує спектральний аналіз, щоб визначити доступні канали зв'язку та можливість їх використання, що дозволяє використовувати канали, які в цей момент не використовуються;

- автоматична адаптація – система може автоматично адаптуватися до змін у спектрі радіохвиль та інших параметрах, що дозволяє забезпечувати стійку та надійну роботу системи;

- багатоканальна комунікація – DARPA ART може використовувати багатоканальну комунікацію для забезпечення максимальної пропускну здатності та якості зв'язку;

- віддалене керування – DARPA ART може бути керована з БпЛА за допомогою радіо.

За програмою DARPA Adaptive RF Technology ведуться дослідження і розробки технологій, що дозволяють створювати радіоелектронні пристрої, які можуть адаптуватися до змінних умов роботи каналу зв'язку. Одним із напрямів розробок є використання когнітивного радіо в межах мережі БпЛА для автоматичного розподілу частотних діапазонів та мінімізації взаємовпливу радіоелектронних систем. Використання когнітивного радіо може допомогти вирішити проблему з наявністю обмежених ресурсів, зокрема, енергетичних, що виникає при роботі безпілотних літальних апаратів. За допомогою когнітивного радіо можна ефективно розподіляти обмежені ресурси, забезпечуючи оптимальну роботу БпЛА. Когнітивне радіо може бути використано для автоматичного розпізнавання сигналів, забезпечуючи БпЛА можливість самостійно виявляти й реагувати на зміни в роботі радіоканалу. Також когнітивне радіо може допомогти покращити точність геолокації БпЛА, що є важливою складовою при здійсненні розвідки та моніторингу [1].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Проведений аналіз останніх досліджень і публікацій показав, що попри великий спектр наукових праць, на сьогодні немає універсального та загальноприйнятого підходу до застосування технологій когнітивного радіо для протидії впливу засобам РЕБ противника на бездротові засоби передавання даних (БЗПД).

Метою статті є розробка моделі каналу зв'язку БЗПД з використанням технологій програмно визначеного радіо (SDR), когнітивного радіо та нейронних мереж, призначеного для використання в БпЛА за умови активної протидії засобів РЕБ противника.

Виклад основного матеріалу. Когнітивне радіо може використовувати діапазони частот, які не глушаться РЕБ противника і залишені ним для зв'язку своїх підрозділів, шляхом використання технологій 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 спектру. 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.

Створення моделі каналу когнітивного радіо для БпЛА передбачатиме виконання таких етапів:

1. Визначення характеристик каналу (рівня шуму, спотворень та втрат сигналу в каналі зв'язку).
2. Визначення характеристик передавача (потужність, частота передачі, модуляція та кодування).
3. Визначення характеристик приймача (чутливість, діапазон частот, алгоритми демодуляції та декодування).
4. Моделювання поведінки засобів РЕБ противника (моделювання спектральної активності засобів РЕБ у відповідному діапазоні частот).
5. Використання алгоритмів керування каналом – визначення критеріїв для вибору вільного діапазону частот та визначення алгоритму для зміни параметрів передачі даних в разі постановки завад.
6. Використання отриманих параметрів каналу для моделювання передачі даних у когнітивному радіо.
7. Аналіз отриманих результатів (для оцінювання ефективності роботи когнітивного радіо в різних умовах).

Враховуючи вищевказані етапи, можна створити модель каналу когнітивного радіо для БпЛА. Проте слід зазначити, що створення точної моделі каналу може бути досить складним завданням, оскільки потребує збору значної кількості даних та їх обробки. Тому здебільшого застосовуються апроксимації та спрощені моделі, які дозволяють забезпечити достатню точність [2].

Швидкість передачі інформації, необхідна для БпЛА, може значно відрізнятись залежно від його завдань та можливостей. Для деяких застосувань, таких як зйомка відео або фотографій, достатньо невеликої швидкості передачі даних. У інших випадках, наприклад, для виконання місії зі збору та передачі розвідувальної інформації, може бути необхідна велика швидкість передачі даних. Зазвичай швидкість передачі даних для БпЛА варіюється від кількох мегабіт на секунду (Мбіт/с) до кількох гігабіт на секунду (Гбіт/с), залежно від конкретних потреб і можливостей БпЛА. Наприклад, для передачі відео високої чіткості (HD) потрібна швидкість передачі даних не менше 6 Мбіт/с, а для передачі відео у форматі 4K – не менше 20 Мбіт/с. Однак для розвідувальних БпЛА можуть використовуватись не тільки передача відео, а й передача інших типів даних, таких як звукові, теплові або інші сенсорні дані. У таких випадках швидкість передачі даних може бути меншою, залежно від типу даних та їх обсягу. Для більш точного визначення потрібної швидкості передачі даних необхідно розглядати конкретні вимоги проєкту та специфікації БпЛА.

Потужність передавача БпЛА може значно варіюватись залежно від типу та розміру БпЛА, особливостей його застосування та регуляторних обмежень. Зазвичай БпЛА використовують передавачі з низькою потужністю для забезпечення компактності, низького споживання енергії та довгого часу польоту. У найменших безпілотних апаратах, таких як мікро- і нанодрони, потужність передавача може бути в межах від кількох мВт до кількох Вт. Для середніх і великих БпЛА, таких як багатоцільові дрони, потужність передавача може сягати декількох Вт або більше. Діапазони потужності передавачів БпЛА можуть бути регульовані відповідно до вимог і обмежень національних та міжнародних нормативних актів, таких як правила електромагнітної сумісності та спектрального управління. Точні значення потужності передавача БпЛА в конкретній системі можуть бути визначені вимогами проєкту та відповідними регуляторними вимогами.

У сучасних БПЛА для передачі зображень використовується цифрова модуляція. Один із найпоширеніших типів модуляції для передачі зображень є метод модуляції з фазовим зрушенням (Phase Shift Keying, PSK). PSK дозволяє передавати цифрові дані шляхом зміни фази несучої хвилі. Залежно від конкретних вимог та характеристик системи зв'язку в БПЛА можуть використовуватись різні варіації PSK, такі як Binary Phase Shift Keying (BPSK), Quadrature Phase Shift Keying (QPSK), або 8-Phase Shift Keying (8-PSK). Кожен із цих варіантів PSK має різний рівень роботи та швидкість передачі даних. Використання цифрової модуляції дозволяє передавати зображення у високій якості та ефективно використовувати доступну пропускну здатність каналу зв'язку. Точний тип модуляції, що використовується, може варіюватись залежно від конкретних вимог системи та особливостей зображення, що має передаватися.

Характеристики приймача БПЛА можуть варіюватись залежно від конкретних моделей і виробників БПЛА, а також вимог до системи зв'язку. Можуть включати наступне:

- чутливість – вказує на мінімальну потужність сигналу, яку може сприймати приймач із заданою якістю сигналу;
- робочий діапазон – частотний діапазон, у межах якого приймач може працювати (залежно від типу БПЛА та його застосування, цей діапазон може бути різним);
- селективність – характеристика, яка вказує на здатність приймача розрізняти та приймати сигнали з різних джерел або каналів (висока селективність дозволяє приймачу обирати конкретні сигнали і виключати небажані);
- завадозахищеність – властивість, що описує здатність приймача працювати в умовах наявності електромагнітних завад або шуму (висока завадозахищеність дозволяє приймачу ефективно фільтрувати шум та завади й отримувати чистий сигнал);
- швидкість прийому даних – число, яке вказує на швидкість передачі даних, яку приймач може обробляти. Швидкість прийому даних може варіюватись залежно від специфікацій приймача та вимог конкретної системи зв'язку.

Моделювання спектральної активності засобів радіоелектронної боротьби у відповідному діапазоні частот може виконуватись з використанням спеціалізованих програмних засобів або інженерних інструментів. Основна мета моделювання – дослідження поведінки РЕБ-системи та визначення її впливу на радіоелектронні пристрої та системи у спектральному діапазоні. Основні кроки моделювання спектральної активності засобів РЕБ включають:

- визначення параметрів РЕБ-системи (це включає в себе параметри, такі як потужність сигналів, ширина смуги, частотні діапазони та модуляційні схеми, які використовуються РЕБ для генерації радіозавад);
- створення моделі спектральної активності (на основі визначених параметрів РЕБ-системи створюється модель спектральної активності, яка відображає часовий характер активності РЕБ-сигналів у відповідному діапазоні частот, може бути представлена у вигляді часових діаграм, спектральних графіків або математичних рівнянь);
- симуляція та аналіз (застосовуються спеціалізовані програмні засоби для симуляції впливу спектральної активності РЕБ на радіоелектронні пристрої та системи, що дозволяє аналізувати вплив радіоперешкод на якість та продуктивність комунікаційних систем, виявляти можливі проблеми та знаходити шляхи їх уникнення).

Вибір вільного діапазону частот і алгоритму для зміни параметрів передачі даних в разі постановки завад є важливими аспектами роботи системи когнітивного радіо. Основні критерії для вибору вільного діапазону частот можуть включати:

- перевірку спектральної доступності, тобто чи не використовується цільовий діапазон частот іншими пристроями або системами комунікації;
- оцінку рівня інтерференції та завад в обраному діапазоні частот, щоб забезпечити якісну передачу сигналу;
- дотримання встановлених правил і обмежень використання радіочастотного спектра згідно з регуляторними вимогами.

Щодо алгоритму для зміни параметрів передачі даних в разі постановки завад, це може включати:

- аналіз отриманого сигналу для виявлення наявності завад або інтерференції;
- адаптація параметрів (зміна параметрів передачі, таких як частота, потужність або модуляція, для уникнення або зменшення впливу завад на якість сигналу);
- вибір альтернативного діапазону частот (у разі непридатності поточного діапазону через велику кількість завад або низьку якість зв'язку, може бути виконана автоматична зміна на інший доступний діапазон частот).

Алгоритм для зміни параметрів передачі даних може базуватися на інтелектуальних рішеннях, таких як машинне навчання або розпізнавання патернів, для прийняття рішень щодо оптимальних параметрів передачі в конкретних умовах завад.

Існує кілька типів нейронних мереж, які можуть бути використані для когнітивного радіо:

1. Зворотна зв'язна мережа – це один із найбільш поширених типів нейронних мереж. Вона складається зі шарів нейронів, кожен з яких зв'язаний із попереднім і наступним шарами нейронів. Ця мережа добре підходить для задач розпізнавання образів та класифікації даних.

2. Мережі радіальних базисних функцій – ці мережі використовують радіальні базисні функції як функції активації нейронів. Вони використовуються для задач класифікації даних, виявлення аномалій та передбачення.

3. Мережі довільних функцій – ці мережі мають можливість створення складних нелінійних функцій за допомогою складних математичних функцій. Вони використовуються для задач розпізнавання мови, розпізнавання образів та класифікації даних.

4. Мережі довгої короткочасної пам'яті (LSTM) – це тип нейронних мереж, який добре підходить для обробки послідовних даних, таких як мова або часові ряди. Вони здатні запам'ятовувати довгі послідовності даних та роблять їх короткочасну пам'ять доступною для довшого часу.

Ми використовуватимемо у своїй моделі саме LSTM мережу. Використання LSTM (Long Short-Term Memory) мережі для когнітивного радіо БпЛА має декілька переваг:

- обробка послідовних даних – LSTM мережа є рекурентною нейронною мережею, яка має здатність ефективно обробляти послідовні дані, такі як часові ряди радіосигналів, що надходять від різних джерел. Це особливо корисно для когнітивного радіо, яке повинне аналізувати й моделювати динамічні зміни в спектрі радіочастотного діапазону;

- моделювання контексту – LSTM мережа може зберігати та використовувати довгострокові залежності в даних. Це дозволяє моделювати контекстуальну інформацію, яка може бути важливою для когнітивного радіо. Наприклад, врахування історії змін у спектрі може допомогти виробити кращі рішення щодо вибору вільних частот для передачі даних;

- здатність до узагальнення – LSTM мережі можуть відтворювати складні залежності в даних і мати здатність до узагальнення на нові дані. Це важливо для когнітивного радіо, оскільки спектральні характеристики можуть змінюватися в різних умовах та середовищах. LSTM мережа може навчитися розпізнавати шаблони та залежності, що дозволяє зробити більш точні прогнози та рішення;

- адаптивність до зміни умов – когнітивне радіо повинне бути адаптивним до змін у спектральному середовищі та радіоумовах. LSTM мережа може бути тренувана на основі нових даних та адаптуватися до нових умов. Це дозволяє забезпечити високу робочу ефективність когнітивного радіо БпЛА у мінливих радіоумовах;

- здатність до вирішення послідовних задач, таких як передбачення майбутніх значень частотного спектра або розпізнавання радіосигналів з динамічною модуляцією. Це дозволяє використовувати LSTM мережі для реалізації різних функцій когнітивного радіо, включаючи виявлення вільних частот, управління спектром та адаптивне кодування й модуляцію.

Таким чином, використання LSTM мереж для когнітивного радіо БпЛА може покращити здатність системи до аналізу й адаптації до змінних спектральних умов, забезпечуючи більш ефективне використання доступного радіочастотного ресурсу та підвищуючи продуктивність комунікації та спектрального управління [4].

Для розробки й відлагодження нашої тестової моделі використовуємо SDR-радіо HackRF One. Це програмно-визначена радіопериферія, здатна передавати або приймати радіосигнали в діапазоні від 1 МГц до 6 ГГц. Розроблена для тестування і розробки сучасних радіотехнологій і радіотехнологій наступного покоління, HackRF One – це апаратна платформа з відкритим вихідним кодом, яку можна використовувати як USB-периферійний пристрій або запрограмувати для автономної роботи (рис. 1) [8].

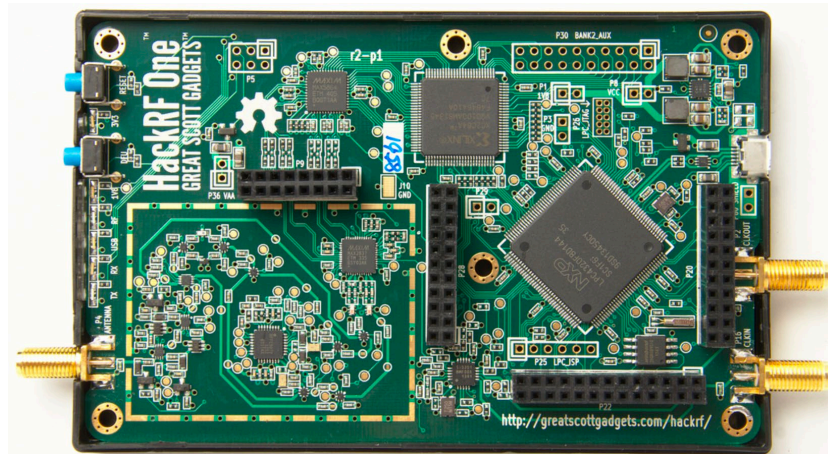


Рис. 1. Зовнішній вигляд SDR-платформи HackRF One

Розроблена модель каналу зв'язку БЗПД, призначеного для використання в БпЛА за умови активної протидії засобів РЕБ противника, зображена на рис. 2. Приймач, передавач, блок узгодження, модулятор і демодулятор використовуються зі складу апаратної частини HackRF One.

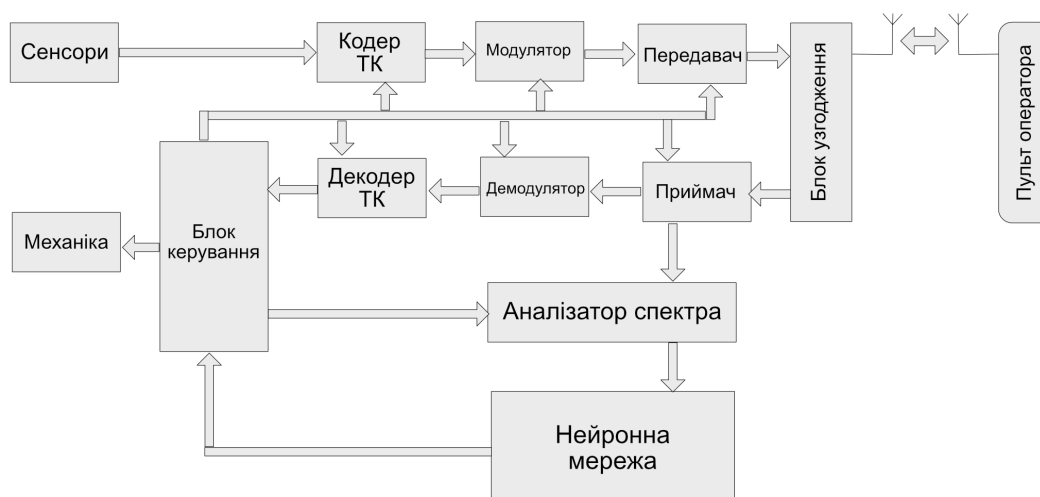


Рис. 2. Модель каналу зв'язку БЗПД з використанням технологій програмно визначеного радіо (SDR), когнітивного радіо та нейронних мереж, призначеного для використання в БпЛА за умови активної протидії засобів РЕБ противника

Як аналізатор спектра використовуємо GNU Radio – 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 [7].

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. Турбокодування може зменшити кількість помилок при передачі даних, що може збільшити надійність комунікації, особливо в умовах шуму та інтерференції. Крім того, турбокодування може забезпечити більшу пропускну здатність каналу, що може бути корисним для передачі великих обсягів даних в обмежених діапазонах частот.

Не треба забувати, що є деякий компроміс між ефективністю та складністю турбокодування та декодування в когнітивному радіо. Висока складність кодування та декодування може збільшити затримку передачі даних та споживання енергії, що може бути непрактичним для використання в пристроях з обмеженнями по об'єму, масі та споживаній потужності, таких як малі БпЛА. Тому, для кожного конкретного випадку варто провести аналіз ефективності та складності використання турбокодів для когнітивного радіо.

Висновки. На сьогодні є очевидним, що існує нагальна потреба в 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 тестової моделі каналу зв'язку бездротових засобів передачі даних, призначеної для відпрацювання технологій протидії засобам радіоелектронної боротьби та навчання нейронної мережі. Застосування цієї моделі дозволить розробити оригінальні вітчизняні алгоритми протидії засобам РЕБ противника.

Список використаних джерел

1. Abe Dr. D. K. Wideband Adaptive RF Protection (WARP) / Dr. D. K. Abe [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.darpa.mil/program/wideband-adaptive-rf-protection>.
2. Valieva I. Spectrum Sensing for Dynamic Spectrum Access in Cognitive Radio / I. Valieva. – Stockholm : E-Print AB, 2020. – 68 p.
3. Cooperative Communications Based on Deep Learning Using a Recurrent Neural Network in Wireless Communication Networks / M. Rathika, P. Sivakumar, K. R. Kumar, I. Garip // *Mathematical Problems in Engineering*. – Vol. 2022. – Article ID 1864290. – 12 p.
4. Jiang W. Recurrent Neural Networks with Long Short-Term Memory for Fading Channel Prediction / W. Jiang, H. D. Schotten // *Proceedings of the 2020 IEEE 91st Vehicular Technology Conference (VTC2020-Spring)* (Antwerp, Belgium, May 2020). – Antwerp, 2020. – Pp. 1-5.
5. Avtobaza [Electronic resource]. – Access mode: <https://en.wikipedia.org/wiki/Avtobaza>.
6. Cognitive RAN Solution [Electronic resource]. – Access mode: <https://saankhyalabs.com/solutions/#cognitive-ran-solution>.
7. GNU Radio [Electronic resource]. – Access mode: https://en.wikipedia.org/wiki/GNU_Radio.
8. HackRF One Hardware [Electronic resource]. – Access mode: <https://hackrf.readthedocs.io/en/latest/index.html>.

References

1. Abe, Dr. D. K. (n.d.). *Wideband Adaptive RF Protection (WARP)*. <https://www.darpa.mil/program/wideband-adaptive-rf-protection>.
2. Valieva, I. (2020). *Spectrum Sensing for Dynamic Spectrum Access in Cognitive Radio*. E-Print AB.

3. Rathika, M., Sivakumar, P., Kumar, K.R., & Garip, I. (2022). Cooperative Communications Based on Deep Learning Using a Recurrent Neural Network in Wireless Communication Networks. *Mathematical Problems in Engineering*, ID 1864290.
4. Jiang, W., Schotten, H.D. (May 2020). Recurrent Neural Networks with Long Short-Term Memory for Fading Channel Prediction. *Proceedings of the 2020 IEEE 91st Vehicular Technology Conference (VTC2020-Spring)*. (pp. 1-5).
5. Avtobaza. <https://en.wikipedia.org/wiki/Avtobaza>.
6. Cognitive RAN Solution. <https://saankhyalabs.com/solutions/#cognitive-ran-solution>.
7. GNU Radio. https://en.wikipedia.org/wiki/GNU_Radio.
8. HackRF One Hardware. <https://hackrf.readthedocs.io/en/latest/index.html>.

Отримано 30.06.23

UDC [004.738.5:351]621.396.6

Serhii Semendiai

graduate student

Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: serhii_semendiai@icloud.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7751-5956>**IMPROVING THE EFFICIENCY OF WIRELESS DATA TRANSMISSION SYSTEMS IN THE CONDITIONS OF ELECTRONIC WARFARE**

The article discusses some of the technologies that ensure the autonomy of unmanned aerial vehicles (UAVs) on the battlefield, methods of increasing the efficiency of UAV communication channels in the context of electronic warfare (EW). The author analyzes the threats to autonomous UAVs that may arise from the use of electronic warfare, and also presents the characteristics of one of the typical modern electronic warfare complexes. This article discusses the development of a test model of a wireless data transmission channel designed to develop technologies for countering electronic warfare and training a neural network. The use of this model will allow the development of original domestic algorithms for countering enemy electronic warfare. The requirements of manufacturers to the electronic equipment of autonomous UAVs are analyzed. The possibility of using non-professional SDR radio equipment and open source software and hardware platforms for the development and verification of these countermeasures algorithms is considered. The algorithm for changing data transmission parameters in the event of interference is determined. The choice of the type of neural network for use in the cognitive radio system of the UAV is substantiated. The idea of applying adaptive coding in UAV communication channels using multicomponent turbo codes in combination with neural networks that are simultaneously used for cognitive radio was further developed. Using information from the neural network about subsequent changes in the communication channel will reduce the adaptation time of the coding system, which will reduce the number of errors in data transmission and increase the reliability of communication, especially when using dynamic spectrum access.

The article is devoted to the problems of creating methods and models that use software-defined radio (SDR), cognitive radio, and multi-level parametric adaptation of turbo-code structures using artificial intelligence to improve the efficiency of wireless data transmission systems in the context of active use of electronic warfare by ensuring the reliability of information.

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

Fig.: 2. References: 8.