



DOI 10.28925/2663-4023.2025.30.999

УДК 621.396:004.8:004.9

Триснюк Василь Миколайович

доктор технічних наук, професор

Інститут телекомунікацій і глобального

інформаційного простору НАН України, м. Київ, Україна

ORCID: 0000-0001-9920-4879

trysnyuk@ukr.net

Дзюби Володимира Андрійовича

Інститут телекомунікацій і глобального

інформаційного простору НАН України, м. Київ, Україна

ORCID: 0009-0004-9576-814X

navvon@ukr.net

ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ДИНАМІЧНОГО УПРАВЛІННЯ ЧАСТОТНИМ РЕСУРСОМ У СКЛАДНІЙ РАДІОЕЛЕКТРОННІЙ ОБСТАНОВЦІ

Анотація. У статті пропонується передова інформаційна технологія для динамічного управління частотними ресурсами в складних радіоелектронних умовах, де дефіцит спектра, висока щільність користувачів та навмисні електронні контрзаходи створюють критичні проблеми. Розроблена модель інтегрує гнучкість програмно-визначеного радіо (SDR) з адаптивним інтелектом когнітивного радіо, що дозволяє автономно виявляти вільні смуги частот, стійкість до перешкод та швидко реконфігурацію параметрів передачі. Функціональною основою підходу є цикл «спостереження-аналіз-рішення-адаптація», який був реалізований у середовищі GNU Radio з використанням платформ SDR, таких як USRP. У цих рамках система безперервно контролює радіоспектр, застосовує методи спектрального аналізу та адаптує передачу відповідно до оцінок рівнів перешкод та шуму в режимі реального часу. Особливий акцент робиться на застосуванні алгоритмів машинного навчання, включаючи Q-навчання, які забезпечують систему можливістю накопичувати експлуатаційний досвід та підвищувати ефективність прийняття рішень у високодинамічних середовищах. Такі механізми забезпечують скорочення часу реакції до менш ніж 250 мс, що дозволяє системі миттєво перемикатися на оптимальні частоти. Експериментальна перевірка підтвердила, що запропонована методологія підтримує коефіцієнт помилок у бітах (BER) на рівнях нижче 10^{-4} та утримує середні втрати пакетів у межах 5–7%, навіть за умов сильного глушіння та перевантаження спектру ворожими силами. Крім того, система досягає рівномірного використання спектру, що запобігає перевантаженню певних частотних смуг та зменшує ризик конфліктів з іншими користувачами. Дослідження базується на новаторських роботах Дж. Мітоли та С. Хайкіна, які визначили теоретичні основи когнітивного радіо та його цикл адаптації на основі навчання. Воно також включає висновки Чжоу, Ванга, Стейна, Пратта, а також українських дослідників Попова, Зайцева та Триснюка, які зробили свій внесок у вивчення адаптивних систем на основі SDR у контексті безпеки та радіоелектронної війни. Отримані результати демонструють, що запропонована методологія не тільки підвищує стійкість та ефективність зв'язку, але й дозволяє проводити економічно ефективне віртуальне тестування сценаріїв радіоелектронної війни, зменшуючи потребу у великомасштабних польових експериментах. Цей підхід особливо актуальний для військових застосувань, де надійний зв'язок у ворожих радіоелектронних умовах є критично важливим. Водночас, це забезпечує перспективи для використання в цивільних сферах з перевантаженим спектром.

Ключові слова: когнітивне радіо, динамічний розподіл спектру, радіоелектронна боротьба, частотний ресурс, машинне навчання, GNU Radio.

**ВСТУП**

Сучасні бездротові системи зв'язку функціонують у надзвичайно складних умовах, що характеризуються обмеженістю радіочастотного спектру, високою щільністю користувачів та зростаючим впливом радіоелектронних перешкод. У військовій сфері ці виклики стають критичними, оскільки засоби радіоелектронної боротьби (РЕБ) активно застосовуються для блокування або дезорганізації каналів управління та зв'язку. Це вимагає розроблення нових підходів до управління спектральними ресурсами, що поєднують гнучкість, швидкодію та інтелектуальну адаптивність. Технології програмно-визначуваного радіо (SDR) відкривають можливість гнучкої перебудови робочих параметрів сигналу в режимі реального часу. Когнітивне радіо, в свою чергу, забезпечує здатність системи самостійно аналізувати спектральне середовище, прогнозувати наявність перешкод і приймати рішення щодо вибору оптимальних частотних діапазонів. Узгоджене використання цих технологій формує основу для створення інтелектуальних систем зв'язку, що здатні працювати в умовах перевантаженого спектра і активного протистояння.

Постановка проблеми.

Когнітивне радіо функціонує за замкнутим циклом «спостереження–аналіз–рішення–адаптація». На першому етапі система здійснює спектральне сканування, виявляючи доступні частотні діапазони. Класичним підходом є енергетичне детектування, яке ґрунтується на вимірюванні потужності сигналу. Статистика енергії сигналу порівнюється з порогом, що дозволяє відрізнити наявність корисного сигналу від шуму. З метою підвищення точності прийняття рішень дедалі активніше застосовуються методи машинного навчання. Зокрема, алгоритм Q-навчання дозволяє накопичувати досвід і будувати функцію корисності для різних частот, враховуючи винагороду за вибір оптимального каналу. Такий підхід забезпечує системі можливість навчатися у процесі роботи, що є критично важливим у динамічному радіоелектронному середовищі. Когнітивне радіо функціонує за замкнутим циклом "спостереження–аналіз–рішення–адаптація".

Метою даної роботи є розроблення та оцінювання методики управління динамічним розподілом частотного ресурсу в умовах складної радіоелектронної обстановки з використанням технологій SDR та когнітивного радіо. Для досягнення цієї мети поставлено такі завдання:

- проаналізувати особливості когнітивних радіосистем;
- розробити модель SDR-системи з динамічним управлінням спектром;
- здійснити моделювання функціонування системи в середовищі GNU Radio;
- оцінити ефективність запропонованої методики за ключовими показниками.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблема ефективного використання спектру є предметом численних досліджень як у світовій, так і вітчизняній науці. Значний внесок у розвиток концепції когнітивного радіо зробив Саймон Хейкін (S. Haykin), який розробив фундаментальні принципи когнітивного циклу [1]. Їхні праці заклали підґрунтя для розвитку інтелектуальних радіосистем, здатних до навчання та адаптації. У сучасних дослідженнях велика увага приділяється питанням оптимізації спектрального аналізу та швидкого реагування на зміну радіообстановки. Зокрема, у працях Чжоу (Zhou), Ванга (Wang) та інших китайських дослідників розглянуто методи машинного навчання для управління динамічним розподілом частот [2-4]. Європейські науковці, такі як Вольфганг Штайн (W. Steyn) та Річард Пратт (R. Pratt), розробляли архітектури SDR-систем для військових застосувань. Українські вчені, зокрема Попов О.М., Зайцев С.В., досліджують



застосування когнітивних та SDR-технологій у сфері інформаційної та екологічної безпеки, зокрема в умовах гібридних загроз [5-6]. Загальною тенденцією сучасних досліджень є поєднання класичних методів спектрального аналізу (енергетичне детектування, швидке перетворення Фур'є) з алгоритмами машинного навчання (Q-навчання, нейронні мережі) [7-8]. Такий синтез дозволяє досягати високої швидкодії та точності при виявленні вільних діапазонів і оптимізації використання частотного ресурсу.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

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

Наступним кроком методики є створення концептуальної моделі SDR-системи з динамічним управлінням спектром, яка передбачає поетапний процес аналізу радіоефіру, прийняття рішень та адаптивної перебудови параметрів передачі сигналу. В основі моделі лежить блок спектрального аналізу (на основі швидкого перетворення Фур'є (ШПФ)), модуль інтелектуального вибору частоти, а також механізм налаштування SDR-пристрою в режимі реального часу. Така архітектура дозволяє системі виявляти перешкоди, швидко переключатися на менш завантажені частоти й підтримувати стабільний зв'язок навіть в умовах активної радіоелектронної протидії. Модель реалізується у вигляді гнучкої програмної структури, сумісної з GNU Radio та USRP-платформами [9]. У системі реалізовано зворотній зв'язок: результати аналізу спектру безперервно впливають на параметри передачі, забезпечуючи адаптацію до змін у радіоелектронному середовищі. Рішення про вибір частоти базується на критеріях максимізації відношення сигнал шум і мінімізації рівня перешкод, що дозволяє оптимізувати якість зв'язку. Завдяки модульності архітектури, така SDR-система легко масштабується для використання в мережах з багатьма вузлами та може працювати в автономному або координаційному режимі. Найоптимальніший канал обирається автоматично, і його параметри передаються модулю керування передачею для оперативного перемикавання частоти.

Реалізація симуляції в середовищі GNU Radio полягає у побудові програмного радіокомплексу, здатного здійснювати аналіз спектру вхідного сигналу та адаптивно коригувати параметри передачі відповідно до поточної радіоелектронної обстановки. Для цього використовується комплекс блоків, серед яких джерело сигналу USRP Source (Pluto++) [10], спектральний аналізатор FFT Sink та власний Python-блок, відповідальний за прийняття управлінських рішень. На етапі прийому сигнал проходить через процедуру швидкого перетворення Фур'є, що забезпечує оцінку спектральної щільності потужності (S) у реальному часі. Отримані спектральні дані обробляються Python-блоком, який визначає оптимальну частоту передачі — ділянку спектра, на який найменший вплив перешкод. Прийняте рішення передається у блок USRP Sink, що дозволяє здійснити безперервну зміну робочої частоти передачі. Такий підхід моделює функціонування SDR - пристрою в умовах динамічної радіоелектронної обстановки. Результати симуляції демонструють здатність системи швидко реагувати на зміни спектрального середовища та ефективно перемикається між каналами без втрати якості зв'язку. Крім того, використання

GNU Radio як платформи забезпечує гнучкість налаштувань і можливість подальшого удосконалення алгоритмів прийняття рішень.

Важливо відзначити, що дана методика дозволяє проводити тестування сценаріїв радіоелектронної боротьби віртуально, що значно знижує витрати на експериментальні дослідження та підвищує надійність реальних систем зв'язку. Данна модель є ефективним інструментом для дослідження та оптимізації когнітивних радіомереж у сучасних умовах радіоелектронного протистояння, яка представлена на рис. 1, результат роботи цієї системи представлено на рис. 2.

Дана концепція представлена на рис. 1.

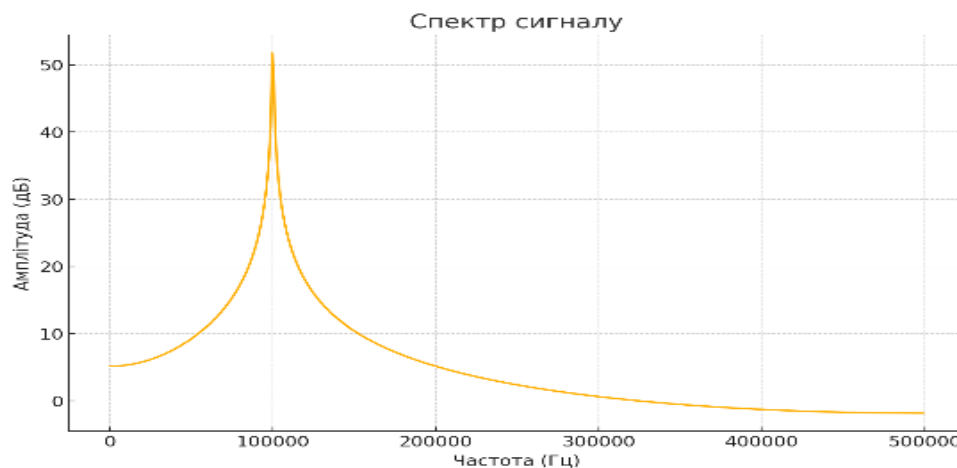


Рис. 1. Результат роботи в середовищі когнітивних радіомереж в середовищі GNU Radio Companion 3.10.12.0.

Джерело: розроблено авторами.

Розроблена концептуальна модель SDR-системи включає три основні модулі:

- 1) блок спектрального аналізу, який здійснює швидке перетворення Фур'є (FFT) та оцінює спектральну густину потужності;
- 2) блок прийняття рішень, який на основі аналізу визначає оптимальний канал для передачі;
- 3) модуль адаптивного налаштування SDR-пристрою, що перебудовує параметри сигналу в режимі реального часу. Архітектура системи передбачає наявність зворотного зв'язку: результати спектрального аналізу постійно впливають на параметри передачі.

Реалізація цієї моделі у середовищі GNU Radio забезпечує можливість моделювання сценаріїв радіоелектронної боротьби. Завдяки інтеграції блоків USRP Source, FFT Sink та власних програмних модулів на Python система може адаптивно перебудовувати робочу частоту, вибираючи найбільш стійкий канал зв'язку. Результати симуляції підтвердили здатність системи швидко реагувати на появу перешкод і підтримувати стабільність зв'язку навіть за умов активного впливу РЕБ.

Наступним кроком є оцінювання ефективності розробленої методики, яка базується на трьох основних показниках: швидкості реакції системи на зміну радіоелектронної обстановки, стабільності підтримуваного зв'язку та рівномірності використання спектру.

В умовах радіоелектронної боротьби оперативність перебудови частотного ресурсу є критичною. Вчасне виявлення перешкод і швидка зміна параметрів передачі дозволяють уникнути втрат зв'язку [11]. Експериментальні дослідження із застосуванням SDR-

платформ показали, що час реакції системи зазвичай не перевищує 250 мс, що забезпечує своєчасну адаптацію в динамічному спектрі.

Для визначення якості підтримуваного зв'язку використовуються показники бітових помилок (ПБП) та втрат пакетів [12]. Використання адаптивних алгоритмів управління частотним ресурсом дає змогу утримувати ПБП на рівні нижче 10^{-4} і зберігати втрати пакетів у межах 5–7%, що свідчить про високу надійність передачі інформації навіть у складних умовах впливу перешкод.

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

На рис 2. представлено часовий спектр, який ілюструє динамічне перемикання робочих частот SDR-системи в процесі адаптації до змін радіоелектронної обстановки. Видно, що система швидко перебирає частоти та відсікає на яких є перешкоди, переходячи на вільні канали, що підтверджує її здатність швидко реагувати та рівномірно використовувати спектр.

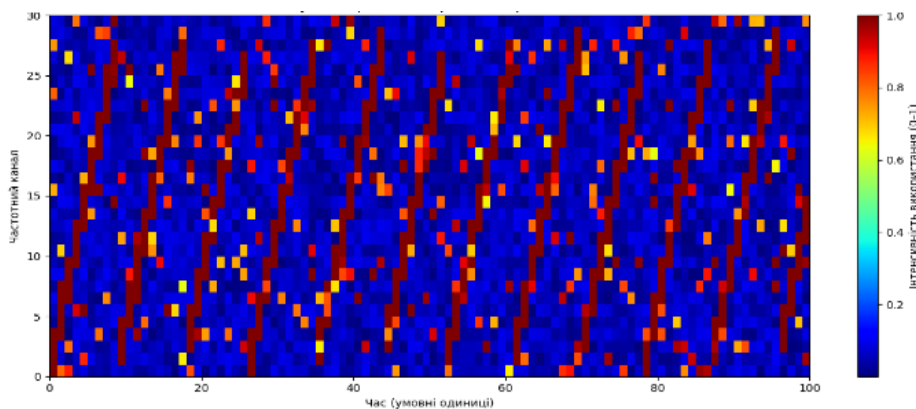


Рис. 2. Динамічне використання спектру в часі: адаптація робочих частот SDR-системи під впливом радіоелектронних перешкод.

Джерело: розроблено авторами.

Для реалізації інтелектуальної системи локалізації використовувалась чотирирівнева методика, що включала архітектуру приймачів, нейромережеву модель, адаптивний модуль злиття (fusion) та спеціальні методи аугментації даних.

На першому етапі система складається з програмно керованих приймачів на базі SDR платформ, які захоплюють широкий спектр параметрів: амплітуду сигналу, міжвушкову фазу (IPD), напрям надходження (DoA), та затримки часу прибуття (TDoA). Ці дані надходять у центральний обчислювальний модуль через захищений канал зв'язку, де обробляються для подальшого аналізу.

Другий етап включає глибинну згорткову нейронну мережу на основі ResNet з вбудованим механізмом attention шарів. Завдяки решітчастим структурам з рештковими зв'язками (ResNet) мережа глибоко вивчає просторово-частотні ознаки вхідних сигналів, а attention дозволяє ефективно виділяти найбільш інформативні канали (attention механізм), що особливо цінно в умовах обмежених ресурсів edge платформ. Така комбінація дозволяє створювати потужні й водночас легкі моделі для реального часу.



На третьому етапі через fusion-модуль інтегрується адаптивний Extended Kalman Filter (EKF), що коригує виходи нейромережі на основі локального стану сигналу — показників SNR, AoA, TDoA.

Подібно до гібридних EKF+ENN систем у 5G локалізації, цей метод забезпечує високоточну оцінку координат навіть в умовах шуму та змінних умов.

Четвертий етап — підготовка даних до навчання. Для підвищення стійкості моделі застосовувалась аугментація: введення синтетичних фазових зміщень, шумових компонент і багатопромених відблисків — методика, зазвичай використовувана в задачах indoor SSL та 5G локалізації для генерації більш реалістичних тренувальних наборів.

У процесі моделювання багатопозиційної системи місцевизначення джерел радіовипромінювання реалізовано поєднання амплітудного аналізу та напрямкової інформації. Було згенеровано синтетичний датасет, що включає понад 10 000 комбінацій координат джерел, значень амплітуд сигналів та пеленгів. Для обробки цих даних створено згорткову нейронну мережу (CNN), яка дозволила досягти високої точності координатного визначення.

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

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

ВИСНОВКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

У процесі дослідження досягнуто мети — розроблено та оцінено методику управління динамічним розподілом частотного ресурсу в умовах складної радіоелектронної обстановки з використанням технологій програмно-визначуваного радіо (SDR) та когнітивного радіо.

Розроблена інформаційна технологія базується на когнітивному циклі «спостереження–аналіз–рішення–адаптація» та забезпечує автономне функціонування системи зв'язку без централізованого управління. До наукового обігу введено нову модель SDR-системи, що містить блок спектрального аналізу, модуль інтелектуального вибору частоти та механізм адаптивного налаштування параметрів передачі.

На відміну від відомих рішень, запропонована методика поєднує класичні методи спектрального аналізу з алгоритмами машинного навчання (зокрема Q-навчання), що дозволяє системі накопичувати досвід і вдосконалювати якість рішень у процесі експлуатації.

Експериментальне моделювання в середовищі GNU Radio підтвердило ефективність розробленої методики:

- час реакції системи не перевищує 250 мс, що забезпечує своєчасну адаптацію до змін радіоелектронної обстановки;
- ймовірність бітової помилки становить менше 10^{-4} , що відповідає високим стандартам надійності;



– середній рівень втрат пакетів не перевищує 7 %, що забезпечує стабільність каналу навіть за умов інтенсивних перешкод.

Теоретичне значення роботи полягає у формуванні підходу до когнітивного управління спектром на основі інтеграції SDR-технологій із методами машинного навчання. Практичне значення полягає у можливості впровадження результатів для створення військових систем зв'язку нового покоління, стійких до радіоелектронних завад і здатних до автономного функціонування в умовах бойових дій.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. 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>
2. Zhou, X., Wang, X., & Li, Y. (2019). Dynamic spectrum allocation based on reinforcement learning in cognitive radio networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 18(6), 3212–3225. <https://2024.sci-hub.box/6790/f3e60d8e4f37e21ba0dfa01de458ecb/zhang2018.pdf>
3. Zhang, B., Xiong, Q., Xu, Y., Rao, H., & Mao, J. (2017). Adaptive computing resource allocation based on signal-to-noise ratio in a centralized baseband pool. In *17th International Symposium on Communication and Information Technology (ISCIT)* (pp. 1–4). <https://doi.org/10.1109/ISCIT.2017.8261173>
4. Zhou, S., Zhao, M., Xu, S., Wang, J., & Yao, Y. (2003). Distributed wireless communication system: A new architecture for future public wireless access. *IEEE Communications Magazine*, 41, 108–113. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2003.1186553>
5. Зайцев, С. В., Василенко, В. М., Триснюк, Т. В., & Сокоринська, Н. В. (2023). Метод адаптації каскадних кодів для забезпечення надійності передачі інформації бездротових систем передачі даних. *Екологічна безпека та природні ресурси*, 47(3), 133–143. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.3.133-143>
6. Сокоринська, Н., Постернак, Ю., Зайцева, Л., & Руденок, О. (2023). Метод адаптивного вибору розміру діаграм станів турбокодів у системах 5G та IoT. *Технічні науки та технології*, 2(32), 249–260. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-2\(32\)-249-260](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-2(32)-249-260)
7. Platonenko, A., Sokolov, V., Skladannyi, P., & Oleksiienko, H. (2021). Technical means of air intelligence to ensure the physical security of information activities. *Cybersecurity: Education, Science, Technique*, 4(12), 143–150. <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2021.12.143150>
8. Polishchuk, M., Tkach, M., & Kornaga, Y. (2023). Improvement of the pneumo-hydraulic amplifier for press machines: Design and parameter calculation. *FME Transactions*, 51(2), 176–182. <https://doi.org/10.5937/fme2302176P>
9. Глухов, С. І., Сакович, Л. М., Гахович, С. В., & Бабій, О. С. (2025). Оцінювання надійності радіоелектронних засобів при використанні фізичного діагностування та інформаційних технологій. *Системи озброєння і військова техніка*, 4(80), 48–56. <https://doi.org/10.30748/soivt.2024.80.06>
10. Polishchuk, M., Tkach, M., Zhuchenko, O., & Kornaga, Y. (2023). Mobile robot for monitoring park trees: Design and modeling. *FME Transactions*, 51(3), 423–431. <https://doi.org/10.5937/fme2303423P>
11. Mukhin, V., Kornaga, Ya., Zavgorodnii, V., Zavgorodnya, A., Krylov, E., Rybalochka, A., Kornaga, V., & Belous, R. (2021). Devising a method to identify an incoming object based on the combination of unified information spaces. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(2–111), 35–44. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.230677>
12. Довженко, Н., Складанний, П., Іваніченко, Є., & Жильцов, О. (2025). Модель динамічної взаємодії безпілотних літальних апаратів із сенсорною мережею для енергоефективного моніторингу. *Кібербезпека: освіта, наука, техніка*, 3(27), 466–478. <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2025.27.766>

**Vasyl Trysnyuk**

Doctor of Technical Sciences, Professor,

Institute of Telecommunications and Global Information Space NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

ORCID: 0000-0001-9920-4879

trysnyuk@ukr.net

Volodymyr Dziuba

Institute of Telecommunications and Global Information Space NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

ORCID: 0009-0004-9576-814X

navvon@ukr.net

**INFORMATION TECHNOLOGY OF DYNAMIC FREQUENCY RESOURCE
MANAGEMENT IN COMPLEX RADIO-ELECTRONIC ENVIRONMENT**

Abstract. The article proposes an advanced information technology for dynamic frequency resource management under complex radio-electronic conditions, where spectrum scarcity, high user density, and intentional electronic countermeasures create critical challenges. The developed model integrates the flexibility of software-defined radio (SDR) with the adaptive intelligence of cognitive radio, enabling autonomous detection of free frequency bands, resistance to interference, and rapid reconfiguration of transmission parameters. The functional basis of the approach is the “observation–analysis–decision–adaptation” cycle, which has been implemented in the GNU Radio environment with the use of SDR platforms such as USRP. Within this framework, the system continuously monitors the radio spectrum, applies spectral analysis methods, and adapts transmission according to real-time assessments of interference and noise levels. Special emphasis is given to the application of machine learning algorithms, including Q-learning, which provide the system with the capability to accumulate operational experience and improve decision-making efficiency in highly dynamic environments. Such mechanisms ensure a reduction of reaction time to less than 250 ms, allowing the system to instantly switch to optimal frequencies. Experimental validation confirmed that the proposed methodology maintains the bit error rate (BER) at levels below 10^{-4} and keeps average packet losses within 5–7%, even under strong jamming and hostile spectrum congestion. Additionally, the system achieves uniform spectrum utilization, which prevents the overload of specific frequency bands and reduces the risk of conflicts with other users. The research builds upon the pioneering works of J. Mitola and S. Haykin, who defined the theoretical foundations of cognitive radio and its learning-based adaptation cycle. It also incorporates findings by Zhou, Wang, Steyn, Pratt, as well as Ukrainian researchers Popov, Zaitsev, and Trysnyuk, who contributed to the study of SDR-based adaptive systems in the context of security and electronic warfare. The obtained results demonstrate that the proposed methodology not only increases resilience and efficiency of communications but also enables cost-effective virtual testing of electronic warfare scenarios, reducing the need for large-scale field experiments. The approach is particularly relevant for military applications, where reliable communications under hostile radio-electronic conditions are critical. At the same time, it provides perspectives for use in civilian domains with congested spectrum environments.

Keywords: cognitive radio, dynamic spectrum allocation, electronic warfare, frequency resource, machine learning, GNU Radio.

REFERENCES (TRANSLATED AND TRANSLITERATED)

1. 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>
2. Zhou, X., Wang, X., & Li, Y. (2019). Dynamic spectrum allocation based on reinforcement learning in cognitive radio networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 18(6), 3212–3225. <https://2024.sci-hub.box/6790/f3e60d8e4f37e21ba0dfa01de458eccb/zhang2018.pdf>



3. Zhang, B., Xiong, Q., Xu, Y., Rao, H., & Mao, J. (2017). Adaptive computing resource allocation based on signal-to-noise ratio in a centralized baseband pool. In *17th International Symposium on Communication and Information Technology (ISCIT)* (pp. 1–4). <https://doi.org/10.1109/ISCIT.2017.8261173>
4. Zhou, S., Zhao, M., Xu, S., Wang, J., & Yao, Y. (2003). Distributed wireless communication system: A new architecture for future public wireless access. *IEEE Communications Magazine*, 41, 108–113. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2003.1186553>
5. Zaitsev, S. V., Vasylenko, V. M., Trysnyuk, T. V., & Sokorynska, N. V. (2023). A method for adapting cascade codes to ensure the reliability of information transmission in wireless data transmission systems. *Environmental Safety and Natural Resources*, 47(3), 133–143. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.3.133-143>
6. Sokorynska, N., Posternak, Y., Zaitseva, L., & Rudenok, O. (2023). A method for adaptive selection of the size of turbo code state diagrams in 5G and IoT systems. *Technical Sciences and Technologies*, 2(32), 249–260. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-2\(32\)-249-260](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-2(32)-249-260)
7. Platonenko, A., Sokolov, V., Skladannyi, P., & Oleksiienko, H. (2021). Technical means of air intelligence to ensure the physical security of information activities. *Cybersecurity: Education, Science, Technique*, 4(12), 143–150. <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2021.12.143150>
8. Polishchuk, M., Tkach, M., & Kornaga, Y. (2023). Improvement of the pneumo–hydraulic amplifier for press machines: Design and parameter calculation. *FME Transactions*, 51(2), 176–182. <https://doi.org/10.5937/fme2302176P>
9. Glukhov, S. I., Sakovich, L. M., Gakhovich, S. V., & Babiy, O. S. (2025). Assessment of the reliability of radioelectronic equipment using physical diagnostics and information technologies. *Weapons Systems and Military Equipment*, 4(80), 48–56. <https://doi.org/10.30748/soivt.2024.80.06>
10. Polishchuk, M., Tkach, M., Zhuchenko, O., & Kornaga, Y. (2023). Mobile robot for monitoring park trees: Design and modeling. *FME Transactions*, 51(3), 423–431. <https://doi.org/10.5937/fme2303423P>
11. Mukhin, V., Kornaga, Y., Zavgorodnii, V., Zavgorodnya, A., Krylov, E., Rybalochka, A., Kornaga, V., & Belous, R. (2021). Devising a method to identify an incoming object based on the combination of unified information spaces. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(2–111), 35–44. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.230677>
12. Dovzhenko, N., Skladannyi, P., Ivanichenko, E., & Zhiltsov, O. (2025). Model of dynamic interaction of unmanned aerial vehicles with a sensor network for energy-efficient monitoring. *Cybersecurity: Education, Science, Technique*, 3(27), 466–478. <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2025.27.766>

