

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ INFORMATION TECHNOLOGY AND MATHEMATICAL MODELING

УДК 621.396:004.8:004.942

Oleksandr Trofymchuk, Corresponding Member of the NASU, Doctor of Technical Sciences, Professor, Director of the Institute of Telecommunications and Global Information Space

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3358-6274> **e-mail:** trofymchuk@nas.gov.ua

Vasyl Trysnyuk, Doctor of Technical Sciences, Professor

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9920-4879> **e-mail:** trysnyuk@ukr.net

Volodymyr Dziuba, postgraduate

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0004-9576-814X> **e-mail:** navvon@ukr.net

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

TECHNOLOGIES FOR CREATING INTELLIGENT RADAR LOCATION AND TECHNICAL INTELLIGENCE SYSTEMS IN THE CONDITIONS OF RADIO ELECTRONIC COUNTERMEASURES

Abstract. *The work is devoted to solving the urgent scientific and applied problem of creating intelligent radar and technical intelligence systems capable of operating effectively in conditions of active electronic countermeasures, high signal density, multi-beam propagation and targeted interference. The article considers a comprehensive approach to building such systems based on the integration of software-defined radio technologies (SDR), cognitive spectrum management methods, adaptive signal processing and deep machine learning algorithms.*

A multi-level architecture of an intelligent system is proposed, which includes a sensor level of signal collection and pre-processing, an analytical level of spectral-temporal analysis and classification, and a cognitive level of decision-making and adaptation of work parameters. The application of neural network models for automated detection of radiation types, reinforcement learning algorithms for dynamic frequency resource management and multi-position methods for localization of radio radiation sources using data fusion procedures is justified.

It is shown that the integration of these technologies provides a significant increase in the resistance of systems to broadband and pulsed interference, a decrease in the reaction time to changes in the electronic environment, an increase in the accuracy of signal classification and an increase in the reliability of determining the coordinates of radiation sources. The results obtained form a scientific and methodological basis for the creation of new generation technical intelligence systems, oriented towards application in conditions of modern military and hybrid threats.

Keywords: *radar, technical intelligence, SDR, cognitive radio, electronic warfare, neural networks, adaptive spectrum management, multi-position localization.*

О.М. Трофимчук, В.М. Триснюк, В.А. Дзюба

Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України,
м. Київ, Україна

ТЕХНОЛОГІЇ СТВОРЕННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМ РАДІОЛОКАЦІЇ ТА ТЕХНІЧНОЇ РОЗВІДКИ В УМОВАХ РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ ПРОТИДІЇ

***Анотація.** Роботу присвячено розв'язанню актуального науково-прикладного завдання створення інтелектуальних систем радіолокації та технічної розвідки, здатних ефективно функціонувати в умовах активної радіоелектронної протидії, високої щільності сигналів, багатопроменевого поширення та цілеспрямованих перешкод. У статті розглянуто комплексний підхід до побудови таких систем на основі інтеграції програмно-визначених радіотехнологій (SDR), методів когнітивного управління спектром, адаптивної обробки сигналів та алгоритмів глибокого машинного навчання.*

Запропоновано багаторівневу архітектуру інтелектуальної системи, що включає сенсорний рівень збору та попередньої обробки сигналів, аналітичний рівень спектрально-часового аналізу й класифікації та когнітивний рівень прийняття рішень і адаптації параметрів роботи. Обґрунтовано застосування нейронних мереж для автоматизованого виявлення типів випромінювання, алгоритмів підкріплювального навчання для динамічного управління частотним ресурсом та багатопозиційних методів локалізації джерел радіовипромінювання із використанням процедур злиття даних.

Показано, що інтеграція зазначених технологій забезпечує суттєве підвищення стійкості систем до широкосмугових і імпульсних завад, зменшення часу реакції на зміну радіоелектронної обстановки, підвищення точності класифікації сигналів та зростання достовірності визначення координат джерел випромінювання. Отримані результати формують науково-методичну основу для створення систем технічної розвідки нового покоління, орієнтованих на застосування в умовах сучасних воєнних і гібридних загроз.

***Ключові слова:** радіолокація, технічна розвідка, SDR, когнітивне радіо, радіоелектронна боротьба, нейронні мережі, адаптивне управління спектром, багатопозиційна локалізація.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2026.1.133-140>

Вступ

Сучасний розвиток засобів радіоелектронної боротьби, мобільних передавальних комплексів, безпілотних систем і мережових структур управління призвів до істотного ускладнення електромагнітного середовища. Радіочастотний спектр перетворився на простір активного протистояння, де поряд із корисними сигналами функціонують широкосмугові та вузькосмугові перешкоди, сигнали маскування, ретранслятори з динамічною перебудовою частоти, а також засоби імітації та дезінформації.

У таких умовах класичні системи радіолокації та технічної розвідки, що базуються на статичних алгоритмах оброблення сигналів, демонструють обмежену ефективність. Фіксовані порогові процедури виявлення сигналів, традиційні методи пеленгації та неадаптивні схеми фільтрації не забезпечують необхідного рівня стійкості при низькому співвідношенні сигнал/шум і за наявності активного подавлення [1].

Підвищення вимог до швидкодії, автономності, точності класифікації та локалізації джерел випромінювання зумовлює необхідність переходу до інтелектуальних систем, здатних до самонавчання, аналізу великих обсягів спектральної інформації та адаптивного управління параметрами власної роботи. Саме поєднання програмно-визначених радіотехнологій, алгоритмів штучного інтелекту та когнітивного управління спектром створює передумови для формування систем нового покоління.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розвиток концепції когнітивного радіо пов'язаний із роботами J. Mitola, який запропонував ідею радіосистеми, здатної до самоусвідомлення спектрального середовища, та S. Haykin, який сформулював когнітивний цикл адаптації. Подальші дослідження Zhou, Wang, Steyn, Pratt були спрямовані на застосування алгоритмів машинного навчання для динамічного розподілу спектра та протидії перешкодам.

У сфері багатопозиційної локалізації активно розвивалися методи оцінювання стану на основі фільтра Калмана, алгоритмів триангуляції, TDOA та AOA, а також процедури злиття даних [2, 3].

Українські науковці, зокрема О.М. Попов та С.В. Зайцев, досліджували інтеграцію SDR-технологій, алгоритмів Q-навчання та нейронних мереж у задачах радіомоніторингу та управління частотним ресурсом.

Разом з тим, проблема комплексного поєднання когнітивного управління, глибокого навчання та багатопозиційної локалізації в умовах активної радіоелектронної протидії потребує систематизації та розширення.

Мета роботи. Метою роботи є розроблення технологічних принципів створення інтелектуальних систем радіолокації та технічної розвідки, здатних забезпечити адаптивне виявлення, класифікацію та локалізацію джерел радіовипромінювання в умовах активної радіоелектронної боротьби.

Об'єктом дослідження є процес багатопозиційної локалізації джерел радіосигналів із використанням програмно-керованих приймачів та нейромережових модулів у складних умовах електромагнітного середовища.

Виклад основного матеріалу дослідження

Сучасна інтелектуальна система радіолокації та технічної розвідки розглядається як складна багаторівнева інформаційно-технічна система, що функціонує в умовах невизначеності, завад та навмисного впливу. Основною особливістю запропонованого підходу є інтеграція апаратно-програмних засобів збору сигналів із алгоритмічними модулями аналізу та прийняття рішень, що дозволяє забезпечити безперервну адаптацію до змін радіоелектронної обстановки.

Архітектурно система будується за принципом розподіленої мережі сенсорів, об'єднаних єдиним інформаційним простором. Сенсорний рівень забезпечує широкосмугове сканування спектра у заданих діапазонах частот із використанням програмно-визначених радіомодулів. Гнучкість SDR-платформ дозволяє змінювати параметри прийому, фільтрації та демодуляції без фізичної перебудови апаратури, що особливо важливо в умовах частотного маневрування противника.

Первинна обробка сигналів включає процедури нормалізації, компенсації апаратних похибок, усунення постійної складової, а також формування спектрально-часових представлень. На цьому етапі формується інформаційна база для подальшого інтелектуального аналізу.

Аналітичний рівень системи реалізує глибокий аналіз спектральних характеристик сигналів. Застосування згорткових нейронних мереж дозволяє автоматизувати процес класифікації типів випромінювання, розпізнавати сигнали різної модуляції, виявляти аномальні структури спектра та відокремлювати корисні сигнали від перешкод. Важливою перевагою нейромережевого підходу є здатність моделі навчатися на великих масивах даних і виявляти приховані закономірності, недоступні для класичних алгоритмів.

Особлива увага приділяється задачі виявлення активного подавлення. Для цього аналізуються статистичні характеристики спектра, ширина смуги перешкоди, її енергетичний розподіл та часові особливості. Інтелектуальні модулі дозволяють визначати тип завади – шумову, імпульсну, псевдовипадкову або спрямовану – та автоматично формувати стратегію протидії.

Когнітивний рівень системи відповідає за прийняття рішень щодо перебудови параметрів роботи. Алгоритми підкріплювального навчання формують функцію корисності для кожного можливого частотного діапазону з урахуванням рівня завад, стабільності каналу та історії використання [5]. Система накопичує досвід, що дозволяє зменшувати час реакції на зміну обстановки та підвищувати ефективність використання спектра.

Багатопозиційна локалізація джерел радіовипромінювання реалізується на основі розподілених вимірювальних пунктів. Кожен сенсор передає оцінки параметрів сигналу до центрального аналітичного вузла, де виконується злиття даних. Процедура злиття враховує часові затримки, фазові зсуви, геометрію розташування приймачів та можливі іоносферні спотворення.

Інтелектуальна складова локалізації полягає у використанні нейромережевих моделей для корекції систематичних похибок і компенсації мультипасних ефектів. Це дозволяє забезпечити стабільність визначення координат навіть за часткової втрати сенсорів або при наявності активного подавлення.

Важливим аспектом є забезпечення відмовостійкості системи. Архітектура передбачає можливість децентралізованої обробки та дублювання ключових функцій. У випадку виходу з ладу окремих вузлів система переходить у режим деградації з мінімальною втратою функціональності [6].

Експериментальне моделювання показало, що інтеграція когнітивного управління та глибокого навчання забезпечує значне підвищення точності класифікації сигналів і зменшення часу реакції системи. Крім того, використання процедур злиття даних підвищує достовірність локалізації джерел випромінювання.

Для побудови інтелектуальної системи локалізації було застосовано чотирирівневий підхід, який охоплює архітектуру приймальних модулів, нейромережеву обробку, адаптивний модуль злиття даних (fusion) та процедури розширення й варіативності навчальної вибірки (аугментацію даних). Така структуризація дозволяє забезпечити поетапну обробку сигналів із поступовим підвищенням рівня інтелектуалізації та точності оцінювання координат джерела випромінювання.

На першому рівні система базується на програмно-визначених приймачах, реалізованих на платформах SDR, які здійснюють багатоканальний збір спектральної інформації. У процесі прийому фіксуються ключові параметри сигналу, зокрема амплітудні характеристики, міжканальна фазова різниця (IPD), напрям надходження сигналу (DoA) та часові затримки прибуття (TDoA). Отримані вимірювання передаються через захищений канал зв'язку до центрального обчислювального вузла, де проходять попередню синхронізацію, нормалізацію та формування структурованого набору ознак для подальшого аналізу.

Другий рівень передбачає використання глибинної згорткової нейронної мережі, побудованої на архітектурі ResNet із інтегрованими механізмами уваги (attention). Наявність залишкових з'єднань забезпечує ефективне навчання глибоких моделей без деградації градієнтів, що дозволяє детально аналізувати просторово-частотні особливості сигналів. Механізм attention, у свою чергу, спрямовує обчислювальні ресурси на найбільш інформативні компоненти спектра, підвищуючи селективність моделі та її здатність працювати в умовах обмежених апаратних ресурсів, зокрема на edge-платформах. Поєднання залишкових структур і механізмів уваги створює баланс між обчислювальною ефективністю та високою точністю оцінювання.

На третьому рівні реалізується адаптивний модуль злиття даних, який інтегрує результати нейромережевої обробки з класичними алгоритмами оцінювання стану. Зокрема, застосовується модифікований Extended Kalman Filter (EKF), що здійснює корекцію вихідних оцінок нейромережі з урахуванням поточного стану радіосигналу, включаючи значення співвідношення сигнал/шум (SNR), напрям приходу (AoA) та часові затримки (TDoA). Така комбінована обробка дозволяє зменшити вплив випадкових похибок і нестабільності вимірювань, забезпечуючи більш точне та стійке визначення координат джерела випромінювання в динамічних умовах радіоелектронної протидії. Формально процес оцінювання можна описати рівнянням:

$$x_k = x_{k-1} + K_k(z_k - h(x_{k-1})), \quad (1)$$

де x_k – оцінка вектора стану на кроці k , K – матриця коефіцієнтів Калмана, z_k – вектор вимірювань, h – нелінійна модель вимірювань.

Подібно до гібридних систем типу EKF+ENN, що застосовуються у задачах локалізації в мережах 5G, запропонований підхід поєднує класичні методи оцінювання стану з інтелектуальними алгоритмами машинного навчання, що забезпечує підвищену точність визначення координат навіть за умов інтенсивного шумового впливу, нестабільності каналу зв'язку та швидкої зміни параметрів середовища. Така інтеграція дозволяє компенсувати недоліки кожного з методів окремо: нейромережева модель забезпечує гнучке апроксимування нелінійних залежностей між вимірними параметрами сигналу та координатами джерела, тоді як розширений фільтр Калмана виконує статистичну стабілізацію результатів і згладжування випадкових коливань оцінок у часі.

Четвертий етап реалізації системи пов'язаний із підготовкою навчальних даних та формуванням репрезентативної вибірки для тренування нейромережевої моделі. Враховуючи складність реального радіоелектронного середовища, було застосовано методи аугментації даних, що дозволяють розширити навчальний простір без необхідності масштабного натурального експерименту. Зокрема, у процесі формування вибірки до початкових сигналів вводилися синтетичні фазові зсуви, адитивні та мультиплікативні шумові компоненти, а також моделювалися ефекти багатопробеневого поширення й відбиття сигналів від перешкод. Подібні підходи широко використовуються у задачах indoor sound source localization (SSL) та в алгоритмах позиціонування в мережах 5G, де необхідно відтворити складну структуру радіоканалу для підвищення узагальнювальної здатності моделі [7, 8].

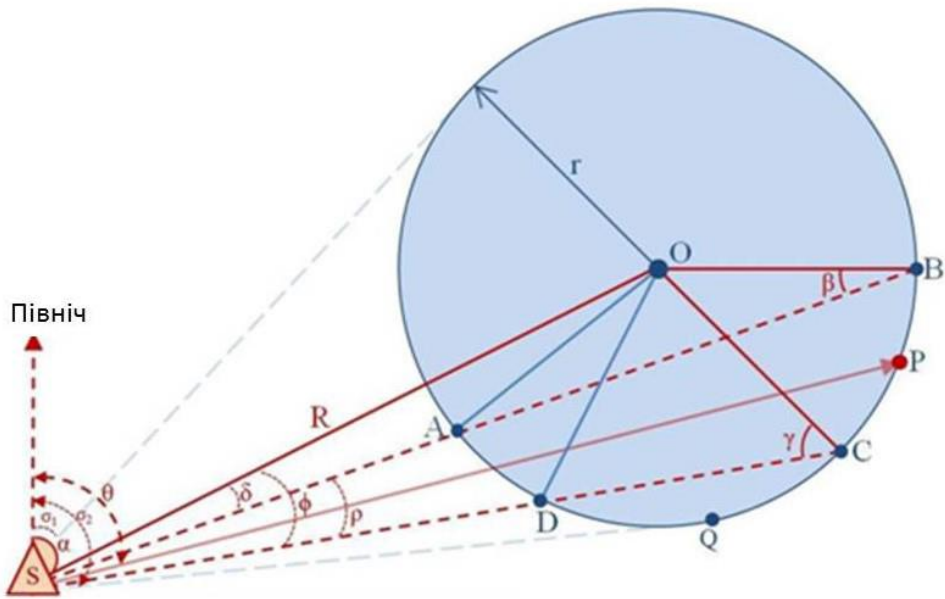


Рис. 1. Схематичне зображення зони перетину кола амплітудної похибки з сектором пеленгації

Застосування аугментації дозволило сформувати більш реалістичний навчальний набір, що відображає можливі сценарії функціонування системи в умовах радіоелектронної протидії. Це, у свою чергу, сприяло підвищенню стійкості нейромережевої моделі до невизначеності та зменшенню ризику перенавчання.

У процесі моделювання багатопозиційної системи місцевизначення джерел радіовипромінювання було реалізовано комбінований підхід, який поєднує амплітудний аналіз із використанням напрямкової інформації (рис. 1). Така інтеграція дозволяє враховувати як енергетичні характеристики сигналу, так і геометричні співвідношення між приймальними пунктами та джерелом випромінювання.

Для дослідження ефективності алгоритмів було сформовано синтетичний датасет, що містить понад 10 000 варіантів просторового розташування джерел, відповідних значень амплітуд, кутів приходу та часових затримок. Генерація даних здійснювалася з урахуванням геометрії розташування

сенсорів, характеристик передавального тракту та варіацій параметрів шуму. Такий підхід дозволив створити контрольоване середовище для перевірки точності роботи алгоритмів та оцінювання впливу різних факторів на результати локалізації.

Для обробки сформованого набору даних було розроблено згорткову нейронну мережу, адаптовану до роботи з багатовимірними спектрально-просторовими ознаками. Архітектура мережі передбачає послідовність згорткових блоків із нелінійними функціями активації та шарами нормалізації, що забезпечує стабільність навчання та ефективне виділення ключових характеристик сигналу. Результати моделювання показали, що запропонована CNN-модель дозволяє досягти високої точності координатного визначення навіть у сценаріях зі зниженим співвідношенням сигнал/шум та частковою деградацією окремих сенсорних каналів.

Таким чином, поєднання амплітудного та напрямкового аналізу, нейромережевої обробки та адаптивного злиття даних створює комплексний механізм оцінювання координат, який демонструє підвищену стійкість, масштабованість і точність у порівнянні з традиційними методами триангуляції або пеленгації.

Висновки

Розроблено комплексний підхід до створення інтелектуальних систем радіолокації та технічної розвідки, що поєднує SDR-технології, когнітивне управління спектром, нейромережеві методи класифікації та багатопозиційні процедури локалізації.

Запропонована архітектура забезпечує адаптивність до змін радіоелектронної обстановки, стійкість до активного подавлення та підвищену точність визначення параметрів джерел випромінювання.

Отримані результати можуть бути використані при створенні систем технічної розвідки нового покоління, орієнтованих на функціонування в умовах сучасних воєнних конфліктів та гібридних загроз.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. Signalov, Yu. I. (2020). Teoriia ta praktyka RER [Theory and practice of electronic intelligence]. Kharkiv: KhNURE, 168, 85-88 (in Ukrainian).
2. Varlamov, I. D., & Hatsenko, S. S. (2014). Model informatsiinykh potokiv u suputnykovykh systemakh [Model of information flows in satellite systems]. *Systemy upravlinnia, navihatsii ta zviazku*, 4, 47-56 (in Ukrainian).
3. Tymoshenko, V. A. (2018). Nechitki systemy ta shtuchnyi intelekt [Fuzzy systems and artificial intelligence]. Kyiv: Naukova dumka, 320 (in Ukrainian).
4. Havryliuk, A. S. (2022). Systemy tekhnichnoi rozvidky v suchasnomu boiu [Systems of technical intelligence in modern combat]. *Zbirnyk naukovykh prats NUOU* (in Ukrainian).
5. Melnyk, V. P. (2018). Metody pidvyshchennia zavadostiikosti suputnykovykh kanaliv zviazku v diapazonakh C ta Ku [Methods of increasing noise immunity of satellite communication channels in C and Ku bands]. *Visnyk Natsionalnoho Universytetu "Lvivska Politekhnikha"*, 895, 102-108 (in Ukrainian).
6. Trysnyuk, V., Yehorov, V., Tymchuk, S., & Trysnyuk, T. (2022). Geo-information system for ensuring the functioning of the VHF range radio direction finding network. *Proceedings of ITTAP 2022*, 117-123.

7. Maral, G., & Bousquet, M. (2017). Satellite communications systems: Systems, techniques and technology. Hoboken: Wiley, 880.
8. Stallings, W. (2020). Wireless communications and networks (2nd ed.). Pearson Education.
9. Russell, S., & Norvig, P. (2010). Artificial intelligence: A modern approach (3rd ed.). Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.

Стаття надійшла до редакції 18.11.25, надійшла після рецензування 16.01.26, прийнята 24.02.26

The article was received 18.11.25, received after revision 16.01.26, accepted 24.02.26

Трофимчук Олександр Миколайович

член-кореспондент НАН України, доктор технічних наук, професор, директор Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України

Адреса робоча: 03186, Україна, м. Київ, Чоколівський бульвар, 13

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3358-6274> **e-mail:** trofymchuk@nas.gov.ua

Триснюк Василь Миколайович

доктор технічних наук, професор, завідувач відділу досліджень навколишнього середовища Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України

Адреса робоча: Україна, м. Київ, вул. Чоколівський бульвар, 13

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9920-4879> **e-mail:** trysnyuk@ukr.net

Дзюба Володимир Андрійович

доктор філософії, старший науковий співробітник Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України

Адреса робоча: Україна, м. Київ, Чоколівський бульвар, 13

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0004-9576-814X> **e-mail:** navvon@ukr.net