



DOI 10.28925/2663-4023.2025.30.950

УДК 004.056

**Бибик Роман Тарасович**

асистент кафедри захисту інформації

Національний Університет «Львівська Політехніка», Львів, Україна

ORCID: 0000-0002-9506-014X

[roman.t.bybyk@lpnu.ua](mailto:roman.t.bybyk@lpnu.ua)**Опірський Іван Романович**

доктор технічних наук, професор,

завідувач кафедри захисту інформації

Національний Університет «Львівська Політехніка», Львів, Україна

ORCID: 0000-0002-8461-8996

[ivan.r.opirskyi@lpnu.ua](mailto:ivan.r.opirskyi@lpnu.ua)**ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ АНАЛІЗУ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ДЖЕРЕЛ РЕБ З  
УРАХУВАННЯМ ПРОСТОРОВО-ЧАСТОТНОГО ОРІЄНТУВАННЯ**

**Анотація:** У статті розглянуто сучасні підходи до аналізу та моделювання джерел радіоелектронної боротьби (РЕБ) із урахуванням просторово-частотного орієнтування. Показано, що розвиток засобів РЕБ суттєво змінює характер сучасних збройних конфліктів, створюючи умови, за яких класичні методи виявлення та протидії сигналам завад втрачають ефективність. У зв'язку з цим актуальним є застосування методів, що дозволяють комплексно оцінювати як частотні, так і просторові характеристики електромагнітних випромінювань. Проаналізовано основні напрями розвитку методів спектрального, статистичного та просторового аналізу, включаючи високороздільні алгоритми (MUSIC, ESPRIT), методи часово-частотних перетворень, а також моделі, що враховують багатопроменевість та динамічні зміни середовища. Особливу увагу приділено підходам до моделювання джерел РЕБ, що дозволяють формувати математичні та імітаційні моделі з урахуванням широкосмуговості, адаптивності та складної структури сигналів. Результати дослідження свідчать, що інтеграція просторово-частотного аналізу із сучасними методами обробки сигналів та інтелектуальними системами забезпечує підвищення ефективності виявлення, ідентифікації та нейтралізації джерел РЕБ. Отримані висновки можуть бути використані для вдосконалення алгоритмів функціонування засобів ураження та створення нових концепцій протидії у сфері радіоелектронної боротьби.

**Ключові слова:** радіоелектронна боротьба, просторово-частотне орієнтування, аналіз сигналів, моделювання джерел, методи локалізації, протидія РЕБ.

**ВСТУП**

Сучасний розвиток військових технологій демонструє стрімке зростання ролі засобів радіоелектронної боротьби (РЕБ) у забезпеченні переваги на полі бою. Здатність впливати на системи зв'язку, навігації, управління військами та високотехнологічне озброєння робить РЕБ одним із ключових елементів ведення бойових дій. Використання широкосмугових завад, спрямованих випромінювань і адаптивних систем придушення істотно ускладнює роботу традиційних засобів протидії, що зумовлює потребу у пошуку нових підходів до аналізу та моделювання джерел електромагнітних завад.

Особливої актуальності набуває застосування просторово-частотного орієнтування засобів ураження. Його суть полягає у врахуванні просторового розподілу та частотних характеристик сигналів під час визначення місця розташування та параметрів джерел випромінювання. На відміну від класичних методів, що працюють лише в часовій або



частотній області, просторово-частотний аналіз дозволяє отримувати багатовимірне представлення сигналів, підвищуючи точність локалізації та ідентифікації джерел РЕБ навіть в умовах багатопроменевого поширення, високого рівня завад та динамічних змін середовища [1-6].

Ключовим напрямом розвитку сучасних систем протидії є створення моделей джерел РЕБ, які відображають їх реальні характеристики. Використання таких моделей дає можливість не лише досліджувати ефективність існуючих методів протидії, але й розробляти нові стратегії адаптивного реагування. Просторово-частотне моделювання дозволяє більш точно оцінювати вплив випромінювань на засоби ураження та оптимізувати їх роботу в реальному часі.

**Мета статті** полягає у проведенні аналізу існуючих методів та підходів до моделювання джерел РЕБ із урахуванням просторово-частотних характеристик.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- здійснити детальний огляд сучасних методів аналізу джерел РЕБ, включаючи класичні та інноваційні підходи;
- визначити можливості застосування моделей, що враховують просторово-частотне орієнтування, для опису процесів випромінювання та поширення сигналів;
- систематизувати підходи до практичного застосування методів аналізу і моделювання в умовах протидії РЕБ, враховуючи обмеження та перспективи розвитку.

Таким чином, стаття спрямована на формування цілісного уявлення про сучасні методи аналізу та моделювання джерел РЕБ і визначення їх ролі у створенні ефективних засобів протидії в умовах інтенсивного використання радіоелектронних систем.

## ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

Проблематика аналізу та моделювання джерел радіоелектронної боротьби (РЕБ) відображена у значній кількості наукових праць як вітчизняних, так і зарубіжних дослідників. У класичних роботах із цифрової обробки сигналів, зокрема у працях Дж. Прокіса, С. Хейкіна та Б. Склара, значна увага приділяється спектральному аналізу, що залишається фундаментом для дослідження електромагнітних сигналів. Методи швидкого перетворення Фур'є та віконних перетворень забезпечують базові можливості для оцінки частотних характеристик, проте у складних умовах динамічного та багатопроменевого середовища їхня ефективність обмежується низькою роздільною здатністю.

У подальших дослідженнях особливу увагу почали приділяти методам високої роздільної здатності, що ґрунтуються на оцінюванні напрямку приходу сигналу. Алгоритми MUSIC та ESPRIT, які набули широкого поширення у масивній антенній обробці, довели свою ефективність при виділенні просторових характеристик джерел випромінювання. Як показують праці Р. Шмідта, Р. Роя та Т. Кайлата, ці методи дозволяють суттєво підвищити точність визначення параметрів сигналів у складних умовах, однак їх застосування вимагає значних обчислювальних ресурсів і страждає від зниження ефективності при низькому відношенні сигнал/шум.

З огляду на нестаціонарність сигналів, які характерні для сучасних засобів РЕБ, все більшого значення набувають часово-частотні методи аналізу. У працях С. Маллата та Л. Когена описуються вейвлет-перетворення та інші підходи, що дозволяють отримувати динамічні часово-частотні представлення сигналів. Такі методи забезпечують ефективне



дослідження завадових випромінювань, спектр яких змінюється у часі, та дозволяють оцінювати адаптивність і складність сигналів РЕБ.

Проблема моделювання джерел РЕБ знайшла відображення у працях українських науковців, зокрема Ю. Наконечного, Р. Бирика, В. Жарікова та С. Мельника, а також у роботах зарубіжних авторів, серед яких варто відзначити М. Павлика та П. Стоїку. У цих дослідженнях виділяють декілька підходів до побудови моделей, зокрема аналітичні, імітаційні та статистичні. Аналітичні моделі забезпечують компактність і простоту використання, проте не завжди відображають усі особливості реального середовища. Імітаційні моделі, навпаки, дозволяють враховувати складні процеси багатопроменевого поширення, адаптивності та динамічності сигналів, що робить їх більш придатними для оцінки ефективності методів протидії. Особливий інтерес викликають просторово-частотні моделі, які поєднують у собі спектральні та просторові характеристики джерел і дозволяють більш адекватно відтворювати умови сучасних бойових дій.

Останнім часом у літературі значна увага приділяється використанню інтелектуальних систем у завданнях аналізу та моделювання сигналів РЕБ. Застосування методів машинного навчання та глибинних нейронних мереж, описане в роботах К. Бішоп, Я. Бенджіо та І. Гудфеллоу, відкрило нові можливості для автоматизованої класифікації джерел випромінювання та побудови адаптивних алгоритмів протидії. Такі підходи дозволяють значно підвищити стійкість систем до складних завадових сценаріїв, а також скоротити час обчислень завдяки використанню оптимізованих моделей.

Таким чином, аналіз літературних джерел дає підстави стверджувати, що розвиток методів аналізу та моделювання джерел РЕБ відбувається у напрямку від класичних спектральних методів до високороздільних алгоритмів та часово-частотного аналізу, а перспективним є поєднання просторово-частотного підходу з технологіями штучного інтелекту. Це дозволяє створювати більш точні та універсальні моделі, здатні працювати в умовах інтенсивного використання засобів РЕБ і забезпечувати ефективне орієнтування та застосування засобів ураження.

## ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПРОСТОРОВО-ЧАСТОТНОГО ОРІЄНТУВАННЯ

Просторово-частотне орієнтування є одним із ключових підходів до аналізу та моделювання сигналів у сучасних системах радіоелектронної боротьби. Його сутність полягає у врахуванні не лише часових характеристик сигналу, але й просторових та спектральних параметрів, що дає змогу більш точно ідентифікувати джерела випромінювання та відокремлювати їх від штучно створених завад. На відміну від традиційних методів спектрального аналізу, просторово-частотні методи дозволяють проводити оцінку напрямку приходу сигналу та його частотних складових одночасно, що істотно підвищує точність локалізації джерел у багатосигнальному середовищі[7-9].

У загальному випадку просторово-частотний аналіз спирається на комбінацію методів спектральної обробки, таких як перетворення Фур'є, вейвлет-аналіз чи узагальнені віконні функції, із методами просторової обробки сигналів на антенних решітках. Використання методів високої роздільності, зокрема MUSIC чи ESPRIT, забезпечує можливість виділення навіть тих джерел, які працюють на близьких частотах або перебувають на малій кутовій відстані.

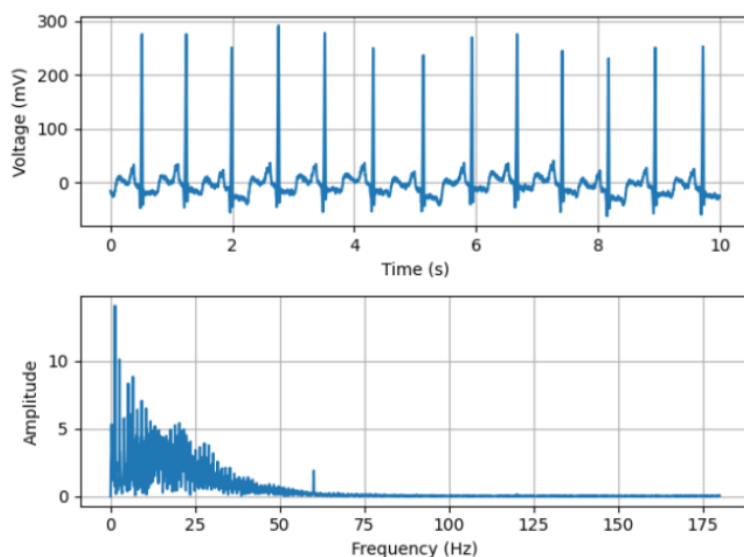


Рис. 1. Спектральний аналіз(перетворення Фур'є)

Особливу роль відіграють умови поширення сигналів у середовищі активного радіоелектронного протиборства. Електромагнітні хвилі в умовах інтенсивного впливу РЕБ зазнають істотних змін, що проявляється у маскуванні корисних сигналів шумовими чи тональними завадами, появи багатопробного поширення внаслідок відбиттів і дифракції, селективному поглинанні окремих частотних діапазонів або ж у динамічній зміні параметрів завадових сигналів. Такі фактори призводять до зниження відношення сигнал/шум, появи фантомних джерел випромінювання та ускладнюють спектральне розділення сигналів. У цих умовах стає особливо актуальним застосування методів просторово-частотного фільтрування, які дозволяють одночасно відкидати завадові сигнали як за їхнім частотним діапазоном, так і за напрямком приходу[9-11].

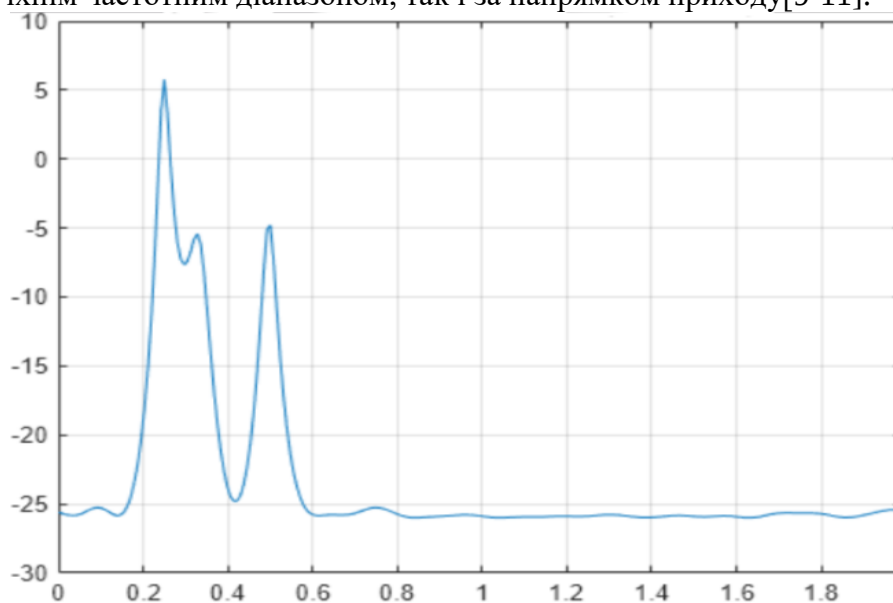


Рис. 2. Приклад визначення складного сигналу за допомогою методу MUSIC(Multiple Signal Classification)

Для кращого розуміння впливу різних типів завад на параметри сигналів наведемо узагальнену таблицю, де показано характерні особливості впливу середовища РЕБ.

Таблиця 1.

**Вплив умов РЕБ на параметри сигналів**

| Умови РЕБ                     | Вплив на сигнал                    | Наслідки для аналізу                    |
|-------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------------|
| Шумові завади                 | Зростання рівня фону               | Погіршення відношення сигнал/шум(SNR)   |
| Тональні завади               | Накладання вузькосмугових сигналів | Ускладнення спектрального розділення    |
| Імпульсні завади              | Короткі сильні імпульси            | Викривлення часових характеристик       |
| Множинні відбитт              | Поява “фантомних” сигналів         | Хибні оцінки кутів приходу              |
| Селективне придушення спектру | Зникнення частотних компонентів    | Втрата інформації про структуру сигналу |

Важливим аспектом просторово-частотного аналізу є взаємозв’язок між просторовими та частотними параметрами сигналів. Просторові характеристики, зокрема азимут і кут місця, визначають напрямок на джерело випромінювання, тоді як частотні параметри, серед яких центральна частота, спектральна ширина та тип модуляції, дають змогу ідентифікувати функціональне призначення джерела, відрізнити, наприклад, радіолокаційну станцію від системи зв’язку або станції активних завад. Поєднання цих характеристик дозволяє відокремлювати джерела, які працюють на близьких частотах, але знаходяться у різних просторових напрямках, або ж навпаки — ті, що розташовані у схожих секторах простору, але відрізняються спектральними параметрами[11].

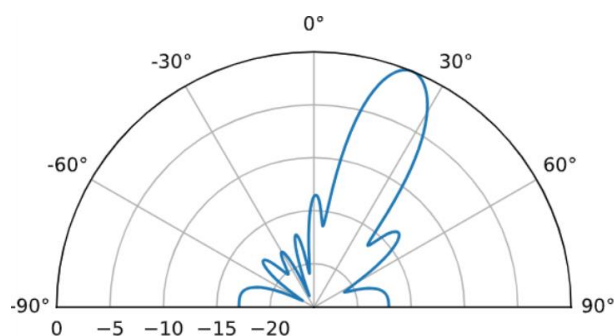


Рис. 3. Приклад отримання сигналу за допомогою методу адаптивного формування променя(Beamforming)

Узагальнені дані щодо застосування просторових і частотних характеристик для вирішення задач локалізації та ідентифікації джерел наведені у наступній таблиці.

Таблиця 2.

**Використання просторових і частотних параметрів**

| Параметр             | Значення для аналізу                   | Приклад застосування                |
|----------------------|----------------------------------------|-------------------------------------|
| Центральна частота   | Ідентифікація типу джерела             | Розпізнавання радарів               |
| Смуга пропускання    | Характеристика режиму роботи           | Виявлення широкосмугових завад      |
| Азимут               | Визначення напрямку на джерело         | Локалізація станції РЕБ             |
| Кут місця            | Визначення висоти розташування джерела | Виявлення авіаційних систем         |
| Поєднання параметрів | Розділення однотипних сигналів         | Відокремлення кількох джерел у полі |



Таким чином, просторово-частотне орієнтування виступає базовою теоретичною основою для сучасних методів аналізу сигналів у складних умовах радіоелектронного протиборства. Воно дозволяє комплексно враховувати як геометричне розташування джерел випромінювання, так і їхню спектральну структуру, що робить можливим ефективне виявлення, класифікацію та моделювання сигналів у багатокomпонентному середовищі.

## МЕТОДИ АНАЛІЗУ ДЖЕРЕЛ РЕБ

Аналіз джерел радіоелектронної боротьби (РЕБ) ґрунтується на поєднанні різноманітних методів спектральної, просторової та статистичної обробки сигналів. Основна мета полягає у виявленні, класифікації та локалізації джерел випромінювання в умовах активного завадового впливу. У сучасних дослідженнях застосовуються як класичні методи спектрального аналізу, так і більш складні алгоритми високої роздільної здатності та статистичної обробки, які дозволяють підвищити точність оцінки параметрів сигналів навіть у заваденасиченому середовищі.

Класичні методи спектрального аналізу є фундаментальною основою для оцінки частотних характеристик сигналів. Найбільш поширеним підходом виступає перетворення Фур'є, яке забезпечує перехід від часової області до частотної, що дозволяє виділити гармонічні складові сигналу. Однак у випадку короткочасних або нестационарних сигналів ефективність цього методу обмежена. Для розширення можливостей аналізу використовуються віконні функції, що дозволяють зменшити спектральні витоки та підвищити роздільну здатність у частотній області. Попри це, класичні методи демонструють низьку ефективність у складних умовах РЕБ, де наявні шумові та тональні завади[11-14].

Таблиця 3.

Порівняння класичних методів спектрального аналізу

| Метод                    | Переваги                                 | Недоліки                                 | Приклад використання                       |
|--------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------|--------------------------------------------|
| Перетворення Фур'є       | Простота реалізації, наочність           | Не підходить для нестационарних сигналів | Аналіз сигналів РЕБ у стаціонарному режимі |
| Віконний Фур'є-аналіз    | Зменшення спектральних витоків           | Втрата часової локалізації               | Виявлення шумових завад                    |
| Короткочасне Фур'є(STFT) | Поєднання часової і частотної інформації | Компроміс між часом і частотою           | Аналіз імпульсних сигналів                 |

Удосконалення класичних методів призвело до появи сучасних підходів, серед яких найбільше значення мають вейвлет-перетворення та методи високої роздільної здатності. Вейвлет-аналіз забезпечує одночасну часово-частотну локалізацію, що є критично важливим для короткотривалих і швидкозмінних сигналів. На відміну від Фур'є-аналізу, який базується на синусоїдальних функціях, вейвлет-перетворення використовує базисні функції з обмеженою тривалістю, що дозволяє адаптивно виділяти особливості сигналів у різних масштабах. Методи високої роздільної здатності, зокрема MUSIC і ESPRIT, застосовуються у багатосигнальних середовищах і дозволяють оцінювати кути приходу сигналів із точністю, недосяжною для класичних підходів.

Таблиця 4.

Сучасні методи спектрального аналізу

| Метод          | Переваги                                                | Недоліки                           | Застосування                          |
|----------------|---------------------------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|
| Вейвлет-аналіз | Локалізація у часу та частоті                           | Вибір базисної функції неочевидний | Виявлення імпульсних завад            |
| MUSIC          | Висока роздільна здатність, робота з багатьма джерелами | Великі обчислювальні витрати       | Локалізація кількох джерел РЕБ        |
| ESPRIT         | Стійкість до шумів, точність                            | Вимоги до калібрування антен       | Аналіз середовищ із сильними завадами |

Особливу роль у задачах аналізу джерел РЕБ відіграють алгоритми оцінки напрямку приходу сигналу (DOA – Direction of Arrival). Вони базуються на вимірюванні фазових і часових зсувів між сигналами, прийнятими на антенних решітках. Класичним прикладом є метод формування променя (Beamforming), який дозволяє виділити сигнал із заданого напрямку. Методи DOA широко застосовуються у поєднанні з MUSIC чи ESPRIT, що забезпечує багатоканальний аналіз у складних умовах. Візуально роботу таких алгоритмів можна представити у вигляді діаграми випромінювання антенної решітки, на якій чітко видно напрямки приходу сигналів від різних джерел.



Рис. 4. Робота адаптивної антенної системи

Окрему категорію становлять методи статистичного аналізу сигналів, які орієнтовані на роботу у заваденасичених умовах. Їхня ефективність ґрунтується на використанні ймовірнісних характеристик, таких як автокореляційні функції, спектральні щільності потужності та крос-кореляційні матриці. Це дозволяє виділяти корисні сигнали навіть за низького співвідношення сигнал/шум. Зокрема, методи адаптивної фільтрації, алгоритми на основі статистичних тестів і підходи до аналізу вищих статистичних моментів сигналів широко застосовуються для боротьби із завадами у системах радіоелектронної розвідки[14-16].

Таблиця 5.

**Методи статистичного аналізу сигналів**

| Метод                   | Переваги                         | Недоліки                   | Приклад використання                |
|-------------------------|----------------------------------|----------------------------|-------------------------------------|
| Автокореляційний аналіз | Виявлення періодичності сигналів | Чутливість до шуму         | Аналіз повторюваних сигналів РЕБ    |
| Крос-кореляція          | Виявлення схожості сигналів      | Високі вимоги до обчислень | Пошук джерел за сталонними зразками |
| Адаптивна фільтрація    | Підлаштування до середовища      | Складність налаштування    | Відокремлення сигналу на фоні шумів |

Таким чином, сучасні методи аналізу джерел РЕБ являють собою поєднання класичних спектральних підходів, новітніх алгоритмів високої роздільної здатності, DOA-оцінювання та статистичних методів.

Комплексне застосування цих підходів дозволяє отримати максимально повну інформацію про джерела випромінювання навіть у складних умовах завадового впливу, що є критично важливим для побудови ефективних систем протидії.

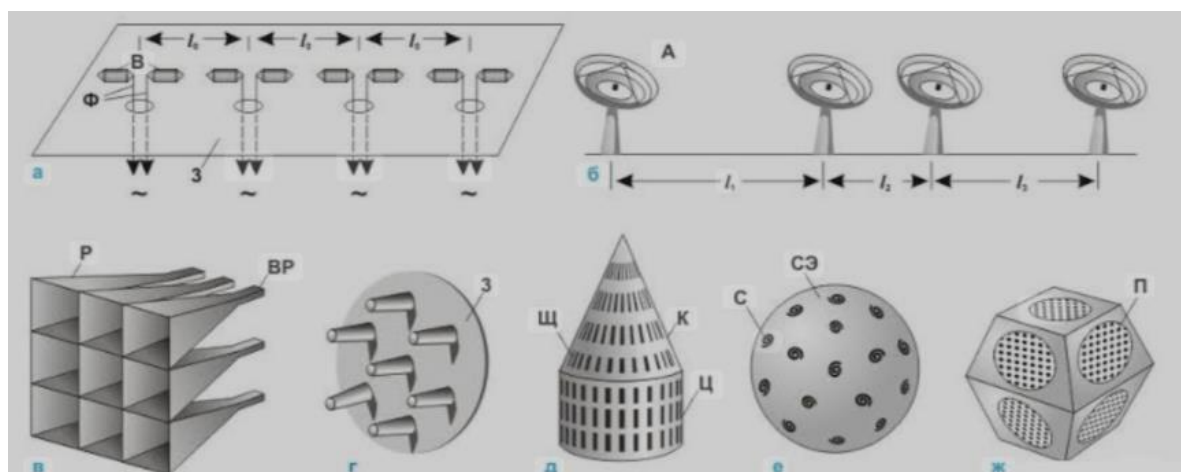


Рис. 5. Структурні схеми деяких фазованих антенних решіток(ФАР)

Структурні схеми деяких фазованих антенних решіток (ФАР) – лінійна еквідистантна з симетричними вібраторами і загальним дзеркалом (а); лінійна нееквідистантна з повноповоротними дзеркальними параболічними антенами (б); плоска з прямокутним розташуванням рупорних випромінювачів (в); плоска з гексагональним розташуванням діелектричних стрижневих випромінювачів (г); конформна з щілинними випромінювачами (д); сферична зі спіральними випромінювачами (е); системи плоских фазованих антенних решіток (ж); В - вібратори; Ф - лінії збудження (фідери); З - струмопровідне дзеркало (рефлектор); А - дзеркальні антени; Р - рупори; ВР - збуджуючі радіохвилі; Е - металевий екран; Щ - щілинні випромінювачі; К - конічна ФАР; Ц - циліндрична ФАР; З - спіральні випромінювачі; СЕ - сферичний екран; П - плоскі фазовані антенні решітки (точками позначені випромінювачі);  $l_0$  - відстань між В;  $l_1$ ,  $l_2$ ,  $l_3$  - відстані між А [14-17].



## МОДЕЛЮВАННЯ ДЖЕРЕЛ РЕБ

Моделювання джерел радіоелектронної боротьби є важливим етапом у розробці систем захисту та протидії, оскільки воно дозволяє прогнозувати поведінку джерел завад у різних умовах та оцінювати ефективність методів протидії. Вибір моделі залежить від конкретних завдань аналізу: для теоретичних досліджень зручно використовувати аналітичні моделі, для випробувань у складних багатокомпонентних середовищах – імітаційні, а для відображення ймовірнісної природи сигналів – статистичні.

Аналітичні моделі будуються на основі математичних рівнянь, що описують електромагнітні процеси у системах. Вони дозволяють вивчати вплив окремих параметрів сигналів, наприклад, потужності, частоти чи ширини спектру, на ефективність завадового впливу. Імітаційні моделі ґрунтуються на чисельному відтворенні сценаріїв роботи джерел РЕБ та їх взаємодії з об'єктами, що піддаються завадам. Такі моделі широко застосовуються для випробувань у віртуальному середовищі, що дозволяє знизити витрати на реальні експерименти. Статистичні моделі відображають ймовірнісний характер параметрів сигналів, оскільки у реальних умовах РЕБ джерела часто змінюють характеристики у випадковий спосіб, щоб ускладнити їх ідентифікацію та локалізацію.

Таблиця 6.

Порівняння підходів до моделювання джерел РЕБ

| Тип моделі  | Переваги                                   | Недоліки                     | Приклади застосування                               |
|-------------|--------------------------------------------|------------------------------|-----------------------------------------------------|
| Аналітичні  | Простота, наочність, швидкі розрахунки     | Обмежена точність, спрощення | Теоретичний аналіз спектра завад                    |
| Імітаційні  | Гнучкість, можливість відтворення сигналів | Високі обчислювальні витрати | Випробування систем у віртуальному середовищі       |
| Статистичні | Врахування ймовірнісної природи сигналів   | Складність побудови моделей  | Оцінка ефективності протидії при змінних параметрах |

Важливим напрямком є моделювання електромагнітного випромінювання джерел у різних умовах поширення. При цьому враховується вплив середовища: відкритий простір, міська забудова, гірська місцевість, наявність багатопроменевого поширення та інтерференцій. У міських умовах значного впливу набуває багатопроменевість, що призводить до появи “фантомних” джерел. У відкритому просторі моделі простіші, однак потребують врахування впливу тропосфери та іоносфери для високочастотних діапазонів. У гірській місцевості важливим фактором стають затінення та дифракція сигналів[17-19].

Окремо виділяються просторово-частотні моделі джерел РЕБ, які дозволяють враховувати як їхнє положення у просторі, так і характеристики спектра. Найбільш типовими є три категорії. Першу становлять одночастотні джерела, що працюють на фіксованій частоті та імітують роботу простих засобів радіоелектронного подавлення. Другу категорію складають широкосмугові джерела, здатні створювати завади у широкому діапазоні частот, що робить їх більш небезпечними для систем із багаточастотним функціонуванням. Третю категорію представляють адаптивні джерела, які змінюють параметри у часі залежно від характеристик сигналів противника, наприклад, здійснюють перебудову частоти, динамічне змінення потужності чи виду модуляції.



Таблиця 7.

Просторово-частотні моделі джерел РЕБ

| Тип джерела   | Характеристика                                            | Сфера застосування                        |
|---------------|-----------------------------------------------------------|-------------------------------------------|
| Одночастотні  | Робота на сталих частотах, стабільні параметри            | Імітація Простих заводських передавачів   |
| Широкосмугові | Покривають широкий частотний діапазон                     | Придушення багаточастотних систем зв'язку |
| Адаптивні     | Змінюють параметри у часі(частота, модуляція, потужність) | Протидія системам із перебудовою частот   |

Приклади застосування таких моделей у системах протидії РЕБ охоплюють широкий спектр завдань. Вони використовуються для тестування алгоритмів розпізнавання та локалізації джерел, для оцінки ефективності методів просторово-частотної фільтрації та для розробки адаптивних засобів захисту. Наприклад, при проектуванні системи активного придушення необхідно враховувати не лише спектральні параметри завод, а й їхнє просторове розташування, що дозволяє більш ефективно спрямовувати енергію у потрібний сектор. У системах радіоелектронної розвідки моделі сигналів застосовуються для навчання алгоритмів штучного інтелекту, які повинні розпізнавати тип джерела та прогнозувати його поведінку у часі.

Таким чином, моделювання джерел РЕБ є фундаментальним інструментом у створенні систем захисту і протидії, адже дозволяє поєднати теоретичний аналіз, імітаційні експерименти та ймовірнісні сценарії, що максимально наближають дослідження до реальних умов бойового застосування[19-20].

## УЗАГАЛЬНЕННЯ МЕТОДІВ АНАЛІЗУ ТА МОДЕЛЮВАННЯ

Узагальнення підходів до аналізу та моделювання джерел радіоелектронної боротьби дозволяє визначити їхні переваги та недоліки, а також окреслити перспективні напрями розвитку. Сучасні методи варіюються від класичних спектральних технік до складних адаптивних алгоритмів, що базуються на штучному інтелекті. Головними критеріями їхньої оцінки виступають точність результатів, складність реалізації та стійкість до заводового впливу.

Класичні методи спектрального аналізу, такі як перетворення Фур'є та віконні функції, є простими у реалізації та добре дослідженими. Проте вони демонструють обмежену точність у випадках короткочасних або широкосмугових сигналів, що часто спостерігається у реальних умовах РЕБ. Методи високої роздільної здатності (MUSIC, ESPRIT) мають значно кращу точність локалізації, проте вимагають великих обчислювальних ресурсів та є чутливими до помилок калібрування антенної решітки. Вейвлет-аналіз поєднує у собі часову та частотну локалізацію сигналів, що робить його ефективним для виявлення адаптивних завод, однак складність вибору оптимальної базисної функції залишається суттєвим викликом.

Таблиця 8.

Порівняльна характеристика методів аналізу сигналів РЕБ

| Метод          | Точність | Складність реалізації | Стійкість до завод | Особливості                                      |
|----------------|----------|-----------------------|--------------------|--------------------------------------------------|
| Фур'є-аналіз   | Середня  | Низька                | Низька             | Підходить для стаціонарних сигналів              |
| Віконні методи | Середня  | Середня               | Низька             | Поліпшена локалізація, але обмежена роздільність |



|                     |             |                |         |                                                   |
|---------------------|-------------|----------------|---------|---------------------------------------------------|
| Вейвлет-переворення | Висока      | Середня/Висока | Середня | Ефективне для нестационарних сигналів             |
| MUSIC, ESPRIT       | Дуже висока | Висока         | Середня | Потребують точної калібровки антенної системи     |
| Статистичні методи  | Середня     | Середня        | Висока  | Враховують ймовірнісну природу сигналів           |
| Методи на основі AI | Дуже висока | Висока         | Висока  | Адаптивні, здатні до навчання та самоналаштування |

Водночас застосування цих методів у реальних умовах має низку обмежень. Основними викликами залишаються висока динамічність сценаріїв РЕБ, наявність сильних завад, багатопроменевість поширення та обмежені обчислювальні ресурси. Для прикладу, алгоритми MUSIC та ESPRIT показують відмінні результати у лабораторних умовах, але в польових експериментах їхня ефективність знижується через нестабільність середовища та складність синхронізації. Статистичні методи більш стійкі, однак потребують тривалого накопичення даних, що знижує їхню оперативність у бойових сценаріях [20-22].

Перспективними напрямками розвитку методів аналізу та моделювання є використання штучного інтелекту, когнітивних технологій та адаптивних алгоритмів. Методи машинного навчання, зокрема глибокі нейронні мережі, дозволяють автоматично розпізнавати типи сигналів та відрізняти їх навіть у складних заваденасичених умовах. Когнітивні системи здатні змінювати власні стратегії залежно від поведінки противника, забезпечуючи динамічну адаптацію. Адаптивні алгоритми просторово-частотної обробки сигналів стають важливими для сучасних систем, оскільки дозволяють гнучко реагувати на зміну спектрального середовища у реальному часі. Таким чином, узагальнення показує, що жоден з методів не є універсальним. У перспективі найбільш ефективним є поєднання класичних математичних моделей із новітніми алгоритмами штучного інтелекту, що дозволить одночасно забезпечити високу точність, адаптивність та стійкість до впливу складних радіоелектронних завад [21].

## ВИСНОВКИ

У ході проведеного дослідження було здійснено комплексний аналіз методів, які застосовуються для виявлення, локалізації та моделювання джерел радіоелектронної боротьби. Результати узагальнення показали, що розвиток таких методів відображає еволюцію наукових підходів: від класичних спектральних і статистичних засобів аналізу до сучасних алгоритмів високої роздільної здатності та інтелектуальних систем.

Класичні методи спектрального аналізу, зокрема перетворення Фур'є та його модифікації, залишаються фундаментальною базою для обробки сигналів. Вони відзначаються простотою реалізації та відносною надійністю, проте демонструють обмеження при аналізі нестационарних або широкосмугових сигналів, що є характерним для джерел РЕБ у сучасних умовах. Методи високої роздільної здатності (MUSIC, ESPRIT) довели свою ефективність у завданнях локалізації сигналів, але потребують високих обчислювальних ресурсів та є чутливими до похибок у конфігурації антенної системи. Вейвлет-аналіз та статистичні методи значно розширили можливості виявлення адаптивних та швидкозмінних завад, оскільки поєднують часову та частотну локалізацію, враховуючи ймовірнісну природу сигналів.



Особлива увага приділялася просторово-частотному орієнтуванню як ключовому підходу для підвищення точності аналізу та ефективності протидії. Просторово-частотні методи дозволяють одночасно враховувати геометричне положення джерел випромінювання та їхні спектральні характеристики, що створює передумови для більш надійної ідентифікації та локалізації. У поєднанні з адаптивними алгоритмами обробки сигналів та інтелектуальними системами такий підхід формує основу для побудови когнітивних технологій, здатних самостійно змінювати стратегії протидії залежно від дій противника.

Водночас дослідження показало наявність низки обмежень і викликів. Серед них можна відзначити складність застосування методів у реальному часі, високу динамічність середовища РЕБ, багатопроменевість поширення сигналів, а також залежність багатьох алгоритмів від точності калібрування обладнання. Незважаючи на те, що статистичні методи демонструють більшу стійкість до завад, їхня потреба у великому обсязі накопичених даних ускладнює використання у швидкоплинних бойових ситуаціях. Це свідчить про те, що універсального методу наразі не існує, і досягнення максимальної ефективності можливе лише за умови комбінованого використання кількох підходів.

Перспективи подальших досліджень у цій сфері пов'язані насамперед із інтеграцією методів аналізу та моделювання з алгоритмами штучного інтелекту і машинного навчання. Використання нейронних мереж, глибинного навчання та когнітивних систем здатне забезпечити високу адаптивність, стійкість до складних завадових умов і можливість функціонування у режимі реального часу. Важливим напрямом є також розробка універсальних просторово-частотних моделей джерел РЕБ, які можна масштабувати для різних типів сигналів і середовищ поширення. Це сприятиме створенню більш гнучких і надійних систем протидії, що відповідатимуть вимогам сучасних і майбутніх конфліктів.

Отже, результати дослідження підтверджують, що просторово-частотне орієнтування є одним із ключових факторів підвищення ефективності систем аналізу та моделювання джерел РЕБ. Його поєднання з сучасними адаптивними та інтелектуальними технологіями відкриває нові можливості для побудови високоефективних систем протидії, здатних оперативно реагувати на загрози та забезпечувати стійкість функціонування засобів ураження у складних умовах інформаційного протиборства.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Sokolov, V., Skladannyi, P., & Platonenko, A. (2022). Video channel suppression method of unmanned aerial vehicles. In *2022 IEEE 41st International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)* (pp. 473–477). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ELNANO54667.2022.9927105>
2. Sokolov, V., Skladannyi, P., & Platonenko, A. (2023). Jump-stay jamming attack on Wi-Fi systems. In *2023 IEEE 18th International Conference on Computer Science and Information Technologies (CSIT)* (pp. 1–5). IEEE. <https://doi.org/10.1109/CSIT61576.2023.10324031>
3. Sokolov, V., Skladannyi, P., & Korshun, N. (2023). ZigBee network resistance to jamming attacks. In *2023 IEEE 6th International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo)* (pp. 161–165). IEEE. <https://doi.org/10.1109/UkrMiCo61577.2023.10380360>
4. Sokolov, V., Skladannyi, P., & Astapenya, V. (2023). Bluetooth low-energy beacon resistance to jamming attack. In *2023 IEEE 13th International Conference on Electronics and Information Technologies (ELIT)* (pp. 270–274). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ELIT61488.2023.10310815>



5. Sokolov, V., Skladannyi, P., & Mazur, N. (2023). Wi-Fi repeater influence on wireless access. In *2023 IEEE 5th International Conference on Advanced Information and Communication Technologies (AICT)* (pp. 33–36). IEEE. <https://doi.org/10.1109/AICT61584.2023.10452421>
6. Sokolov, V., Skladannyi, P., & Astapenya, V. (2023). Wi-Fi interference resistance to jamming attack. In *2023 IEEE 5th International Conference on Advanced Information and Communication Technologies (AICT)* (pp. 1–4). IEEE. <https://doi.org/10.1109/AICT61584.2023.10452687>
7. Haykin, S. (2014). *Communication Systems*. Wiley. <https://www.wiley.com/en-us/Communication+Systems%2C+5th+Edition-p-9780471697909>
8. Sklar, B. (2001). *Digital Communications: Fundamentals and Applications*. Prentice Hall. <https://www.pearson.com/en-us/subject-catalog/p/digital-communications-fundamentals-and-applications/P200000003353/>
9. Van Trees, H. L. (2004). *Detection, Estimation, and Modulation Theory*. Wiley. <https://www.wiley.com/en-us/Detection%2C+Estimation%2C+and+Modulation+Theory%2C+Part+I%2C+Detection%2C+Estimation%2C+and+Linear+Modulation-p-9780471222027>
10. Schmidt, R. (1986). Multiple emitter location and signal parameter estimation. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 34(3), 276–280. <https://doi.org/10.1109/TAP.1986.1143830>
11. Roy, R., & Kailath, T. (1989). ESPRIT — Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 37(7), 984–995. <https://doi.org/10.1109/29.32276>
12. Krim, H., & Viberg, M. (1996). Two decades of array signal processing research: The parametric approach. *IEEE Signal Processing Magazine*, 13(4), 67–94. <https://doi.org/10.1109/79.534070>
13. Mallat, S. (2008). *A Wavelet Tour of Signal Processing*. Academic Press. <https://www.elsevier.com/books/a-wavelet-tour-of-signal-processing/mallat/978-0-12-374370-1>
14. Cohen, L. (1995). *Time-Frequency Analysis*. Prentice Hall. <https://www.pearson.com/en-us/subject-catalog/p/time-frequency-analysis/P200000003342/>
15. Наконечний, Ю. М., & Бибик, Р. Т. (2020). Методи аналізу сигналів у системах РЕБ. Львів: НУЛП. <https://science.lpnu.ua/csn/all-volumes-and-issues/volume-7-number-1-2025/research-of-existing-methods-for-determining-spatial-and-frequency-parameters-of-electronic-warfare-ew-sources>
16. Pawlak, M. (2018). Modelling and simulation of electromagnetic interference sources. *Military Communications Review*. <https://www.researchgate.net/publication/327123456> Modelling and Simulation of Electromagnetic Interference Sources
17. Zeng, Y., & Zhang, R. (2015). Wireless information and power transfer: From theory to practice. *IEEE Communications Magazine*, 53(1), 104–110. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2015.7010537>
18. Li, J., & Stoica, P. (2008). *MIMO Radar Signal Processing*. Wiley. <https://www.wiley.com/en-us/MIMO+Radar+Signal+Processing-p-9780470170935>
19. Wang, X., & Chen, Y. (2021). Spatial-frequency joint processing for source localization in complex environments. *Signal Processing Journal*, 182, 107931. <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2021.107931>
20. Bishop, C. M. (2006). *Pattern Recognition and Machine Learning*. Springer. <https://www.springer.com/gp/book/9780387310732>
21. Goodfellow, I., Bengio, Y., & Courville, A. (2016). *Deep Learning*. MIT Press. <https://www.deeplearningbook.org/>
22. Zhang, X., & Liu, W. (2022). AI-based signal recognition for electronic warfare applications. *IEEE Access*, 10, 34567–34578. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3174567>

**Bybyk Roman Tarasovych**

Asistant of the Departament of Information Security  
Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine  
ORCID ID: 0000-0002-9506-014X  
[roman.t.bybyk@lpnu.ua](mailto:roman.t.bybyk@lpnu.ua)

**Opirskyy Ivan Romanovych**

Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Information Security  
Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine  
ORCID ID: 0000-0002-8461-8996  
[ivan.r.opirskyy@lpnu.ua](mailto:ivan.r.opirskyy@lpnu.ua)

## RESEARCH ON METHODS OF ANALYSIS AND MODELING OF ELECTRONIC WARFARE SOURCES WITH CONSIDERATION OF SPATIAL-FREQUENCY ORIENTATION

**Abstract:** The article examines modern approaches to the analysis and modeling of electronic warfare (EW) sources with consideration of spatial-frequency orientation. It is shown that the development of EW systems significantly changes the nature of contemporary armed conflicts, creating conditions under which classical methods of detection and counteraction against jamming signals lose effectiveness. In this context, the use of methods that allow a comprehensive assessment of both frequency and spatial characteristics of electromagnetic emissions becomes particularly relevant. The main directions in the development of spectral, statistical, and spatial analysis methods are analyzed, including high-resolution algorithms (MUSIC, ESPRIT), time-frequency transformation methods, as well as models that account for multipath propagation and dynamic environmental changes. Special attention is given to approaches for modeling EW sources that allow the creation of mathematical and simulation models considering wideband signals, adaptability, and complex signal structures. The results of the study indicate that integrating spatial-frequency analysis with modern signal processing methods and intelligent systems enhances the efficiency of detection, identification, and neutralization of EW sources. The obtained conclusions can be used to improve the algorithms of weapon systems operation and to develop new concepts for countermeasures in the field of electronic warfare.

**Keywords:** electronic warfare, spatial-frequency orientation, signal analysis, source modeling, localization methods, EW countermeasures.

### REFERENCES

1. Sokolov, V., Skladannyi, P., & Platonenko, A. (2022). Video channel suppression method of unmanned aerial vehicles. In *2022 IEEE 41st International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)* (pp. 473–477). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ELNANO54667.2022.9927105>
2. Sokolov, V., Skladannyi, P., & Platonenko, A. (2023). Jump-stay jamming attack on Wi-Fi systems. In *2023 IEEE 18th International Conference on Computer Science and Information Technologies (CSIT)* (pp. 1–5). IEEE. <https://doi.org/10.1109/CSIT61576.2023.10324031>
3. Sokolov, V., Skladannyi, P., & Korshun, N. (2023). ZigBee network resistance to jamming attacks. In *2023 IEEE 6th International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo)* (pp. 161–165). IEEE. <https://doi.org/10.1109/UkrMiCo61577.2023.10380360>
4. Sokolov, V., Skladannyi, P., & Astapenya, V. (2023). Bluetooth low-energy beacon resistance to jamming attack. In *2023 IEEE 13th International Conference on Electronics and Information Technologies (ELIT)* (pp. 270–274). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ELIT61488.2023.10310815>
5. Sokolov, V., Skladannyi, P., & Mazur, N. (2023). Wi-Fi repeater influence on wireless access. In *2023 IEEE 5th International Conference on Advanced Information and Communication Technologies (AICT)* (pp. 33–36). IEEE. <https://doi.org/10.1109/AICT61584.2023.10452421>
6. Sokolov, V., Skladannyi, P., & Astapenya, V. (2023). Wi-Fi interference resistance to jamming attack. In *2023 IEEE 5th International Conference on Advanced Information and Communication Technologies (AICT)* (pp. 1–4). IEEE. <https://doi.org/10.1109/AICT61584.2023.10452687>



7. Haykin, S. (2014). Communication Systems. Wiley. <https://www.wiley.com/en-us/Communication+Systems%2C+5th+Edition-p-9780471697909>
8. Sklar, B. (2001). Digital Communications: Fundamentals and Applications. Prentice Hall. <https://www.pearson.com/en-us/subject-catalog/p/digital-communications-fundamentals-and-applications/P200000003353/>
9. Van Trees, H. L. (2004). Detection, Estimation, and Modulation Theory. Wiley. <https://www.wiley.com/en-us/Detection%2C+Estimation%2C+and+Modulation+Theory%2C+Part+I%2C+Detection%2C+Estimation%2C+and+Linear+Modulation-p-9780471222027>
10. Schmidt, R. (1986). Multiple emitter location and signal parameter estimation. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 34(3), 276–280. <https://doi.org/10.1109/TAP.1986.1143830>
11. Roy, R., & Kailath, T. (1989). ESPRIT — Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques. IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 37(7), 984–995. <https://doi.org/10.1109/29.32276>
12. Krim, H., & Viberg, M. (1996). Two decades of array signal processing research: The parametric approach. IEEE Signal Processing Magazine, 13(4), 67–94. <https://doi.org/10.1109/79.534070>
13. Mallat, S. (2008). A Wavelet Tour of Signal Processing. Academic Press. <https://www.elsevier.com/books/a-wavelet-tour-of-signal-processing/mallat/978-0-12-374370-1>
14. Cohen, L. (1995). Time-Frequency Analysis. Prentice Hall. <https://www.pearson.com/en-us/subject-catalog/p/time-frequency-analysis/P200000003342/>
15. Nakonechnyi, Y. M., & Bybyk, R. T. (2020). *Methods of signal analysis in electronic warfare systems*. Lviv: Lviv Polytechnic National University. <https://science.lpnu.ua/csn/all-volumes-and-issues/volume-7-number-1-2025/research-of-existing-methods-for-determining-spatial-and-frequency-parameters-of-electronic-warfare-ew-sources>
16. Pawlak, M. (2018). Modelling and simulation of electromagnetic interference sources. Military Communications Review. [https://www.researchgate.net/publication/327123456\\_Modelling\\_and\\_Simulation\\_of\\_Electromagnetic\\_Interference\\_Sources](https://www.researchgate.net/publication/327123456_Modelling_and_Simulation_of_Electromagnetic_Interference_Sources)
17. Zeng, Y., & Zhang, R. (2015). Wireless information and power transfer: From theory to practice. IEEE Communications Magazine, 53(1), 104–110. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2015.7010537>
18. Li, J., & Stoica, P. (2008). MIMO Radar Signal Processing. Wiley. <https://www.wiley.com/en-us/MIMO+Radar+Signal+Processing-p-9780470170935>
19. Wang, X., & Chen, Y. (2021). Spatial-frequency joint processing for source localization in complex environments. Signal Processing Journal, 182, 107931. <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2021.107931>
20. Bishop, C. M. (2006). Pattern Recognition and Machine Learning. Springer. <https://www.springer.com/gp/book/9780387310732>
21. Goodfellow, I., Bengio, Y., & Courville, A. (2016). Deep Learning. MIT Press. <https://www.deeplearningbook.org/>
22. Zhang, X., & Liu, W. (2022). AI-based signal recognition for electronic warfare applications. IEEE Access, 10, 34567–34578. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3174567>

