

## ДОСЛІДЖЕННЯ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ПРОСТОРОВИХ ТА ЧАСТОТНИХ ПАРАМЕТРІВ ДЖЕРЕЛ РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ БОРОТЬБИ (РЕБ)

Р. Т. Биби́к, Ю. М. Наконе́чний

Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра захисту інформації

E-mail: [roman.t.bybyk@lpnu.ua](mailto:roman.t.bybyk@lpnu.ua), [yurii.m.nakonechnyi@lpnu.ua](mailto:yurii.m.nakonechnyi@lpnu.ua)

© Биби́к Р. Т., Наконе́чний Ю. М., 2025

Досліджено сучасні підходи до визначення просторових і частотних параметрів джерел радіоелектронної боротьби (РЕБ), які є ключовими для забезпечення ефективності систем радіоелектронної розвідки, захисту та протидії. Проведено класифікацію існуючих методів, що охоплює просторові, частотні та комбіновані підходи. Розглянуто особливості використання антенних систем, фазових методів, тріангуляції та кореляційного аналізу для визначення просторових характеристик джерел. Проаналізовано спектральні методи, зокрема швидке перетворення Фур'є та вейвлет-аналіз, для визначення частотних параметрів сигналів. Особлива увага приділена комбінованим методам, які інтегрують просторовий і частотний аналіз, а також їх застосуванню в умовах сучасної радіоелектронної боротьби з використанням систем на основі штучного інтелекту. Визначено основні переваги та обмеження кожного з підходів, наведено рекомендації щодо їх вибору залежно від завдань і умов використання. Матеріали статті можуть бути корисними для розробників систем радіоелектронного моніторингу та боротьби, а також для фахівців, які займаються дослідженням і впровадженням новітніх технологій у цій галузі.

**Ключові слова:** радіоелектронна боротьба, просторові параметри, частотні параметри, антенні системи, спектральний аналіз, комбіновані методи, штучний інтелект.

### Вступ

Розвиток сучасних систем радіоелектронної боротьби (РЕБ) створює нові виклики для забезпечення ефективної протидії загрозам у радіоелектронному середовищі. Одним із ключових завдань у цій сфері є точне визначення просторових і частотних параметрів джерел РЕБ, що дає змогу ідентифікувати їх розташування, типи сигналів та характер впливу. Це завдання має вирішальне значення як для радіоелектронної розвідки, так і для захисту критично важливих об'єктів та систем. Сучасні методи визначення просторових та частотних характеристик джерел РЕБ базуються на використанні антенних систем, спектрального аналізу та комбінованих підходів. Водночас розвиток технологій обробки сигналів та застосування штучного інтелекту відкривають нові можливості для вдосконалення таких методів. Проте впровадження цих рішень супроводжується низкою технічних і теоретичних викликів, зокрема пов'язаних із підвищенням точності, швидкодії та надійності систем у реальних умовах. Мета цієї статті полягає у дослідженні та аналізі існуючих методів

визначення просторових і частотних параметрів джерел РЕБ, їх класифікації, а також виявленні переваг, недоліків і перспектив їх застосування. Актуальність дослідження зумовлена зростанням складності сучасного радіоелектронного середовища та необхідністю розробки ефективних методів протидії загрозам. Результати дослідження можуть бути корисними для вдосконалення існуючих систем РЕБ та розвитку нових підходів до аналізу джерел радіоелектронних загроз.

### Огляд літературних джерел

Аналіз літературних джерел свідчить про значний прогрес у розробці методів визначення просторових і частотних параметрів джерел радіоелектронної боротьби (РЕБ). Більшість дослідників зосереджують увагу на удосконаленні алгоритмів і технологій для покращення точності, швидкості та надійності цих методів.

**Просторові методи.** У працях Войтенка В. І. (Основи радіоелектронної боротьби) та Герасимова С. П. (Радіотехнічні методи визначення координат джерел випромінювання) детально описано використання антенних решіток, фазових методів і методів триангуляції. Ці джерела підкреслюють важливість геометричних підходів і точного вимірювання фазових зрушень сигналу для локалізації джерел [1].

**Частотні методи.** Спектральний аналіз і швидке перетворення Фур'є (FFT) є базовими підходами, розглянутими у працях Поповича О. М. (Аналіз спектральних методів в радіоелектронній боротьбі) та Скольнік М. І. (Introduction to Radar Systems). У цих дослідженнях акцент зроблено на можливості високоточних вимірювань частотних параметрів сигналів навіть у складних умовах перешкод [3-4].

**Комбіновані методи.** Інтеграція просторових і частотних характеристик описана у працях [5-9]. У цих джерелах наголошується на ефективності комбінованих методів, зокрема з використанням фазованих антенних решіток, які дають змогу одночасно визначати як просторові, так і частотні параметри.

Наукові праці також містять численні порівняльні аналізи. Наприклад, у праці Шабанова-Кушнаренка Ю. П. (Радіотехнічні системи) наведено класифікацію методів залежно від їх точності, швидкості та ресурсоемності, що є цінним для вибору оптимального методу в конкретних умовах [7].

Отже, література забезпечує глибокий аналіз наявних методів і підходів, а також окреслює перспективи їх подальшого розвитку. Однак, зважаючи на швидкий розвиток технологій, існує потреба у постійному оновленні досліджень та впровадженні інноваційних рішень.

### Мета та постановка завдання

Мета дослідження полягає в аналізі існуючих методів визначення просторових і частотних параметрів джерел радіоелектронної боротьби (РЕБ), їх класифікації, виявленні переваг і недоліків кожного з підходів, а також у формулюванні рекомендацій щодо їх ефективного застосування в умовах сучасної радіоелектронної боротьби.

Постановка завдання передбачає вирішення таких питань:

- провести огляд літературних джерел, присвячених методам визначення параметрів джерел РЕБ, з метою виявлення основних тенденцій та напрямів досліджень;
- здійснити класифікацію існуючих методів визначення просторових і частотних параметрів джерел РЕБ;
- проаналізувати сучасні підходи до визначення просторових параметрів джерел, такі як використання антенних решіток, фазових методів, триангуляції та кореляційного аналізу;
- дослідити частотні методи аналізу, зокрема спектральний аналіз із використанням швидкого перетворення Фур'є та вейвлет-аналізу;

- розглянути комбіновані методи, що інтегрують просторовий і частотний аналіз, із фокусом на застосуванні сучасних технологій, таких як штучний інтелект;
- надати рекомендації щодо вибору найбільш ефективних методів залежно від умов застосування та поставлених завдань.

Вирішення зазначених завдань дасть змогу отримати узагальнену картину сучасного стану методів визначення параметрів джерел РЕБ та сприятиме вдосконаленню систем радіоелектронного моніторингу й захисту.

### Класифікація методів визначення параметрів джерел РЕБ

#### Загальні принципи та підходи

Методи визначення параметрів джерел радіоелектронної боротьби (РЕБ) ґрунтуються на аналізі фізичних характеристик радіосигналів, таких як просторове положення джерела, частота, амплітуда, фаза та поляризація [2- 5]. Основними принципами цих методів є:

- **Використання антенних систем:** застосування фазованих антенних решіток та спрямованих антен для визначення напрямку на джерело.
- **Аналіз спектральних характеристик:** обробка сигналу для виявлення частотних компонентів.
- **Інтеграція даних:** поєднання інформації з різних джерел для підвищення точності визначення параметрів.
- **Застосування алгоритмів обробки сигналів:** використання статистичних та адаптивних підходів для аналізу параметрів сигналів у реальному часі.

Ці принципи забезпечують основу для розробки методів, що дають змогу ефективно аналізувати джерела РЕБ в умовах складного радіоелектронного середовища.



Рис. 1. Методи визначення параметрів джерел РЕБ

Методи визначення параметрів джерел РЕБ можна класифікувати на три основні групи [2- 3]:

- Просторові методи
- Ці методи спрямовані на визначення положення джерела у просторі. Вони містять:
- **Фазові методи:** визначення напрямку на джерело на основі фазових зсувів сигналів між антенами.

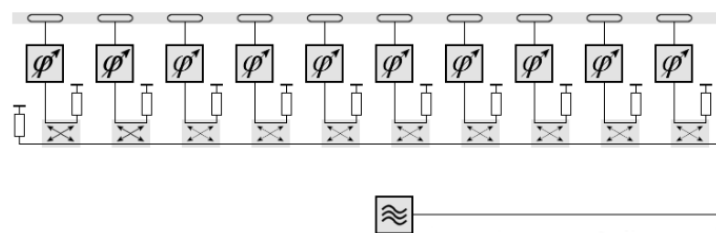


Рис. 2. Фазована решітка з послідовним збудженням та крайовим живленням

- **Методи тріангуляції:** використання кількох приймальних пунктів для визначення положення джерела через геометричні розрахунки.

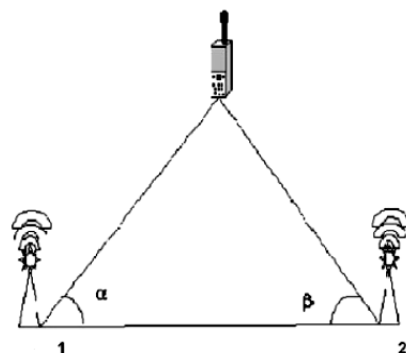


Рис. 3. Метод тріангуляції

- **Методи кореляції:** порівняння сигналів, прийнятих різними антенами, для визначення параметрів джерела.

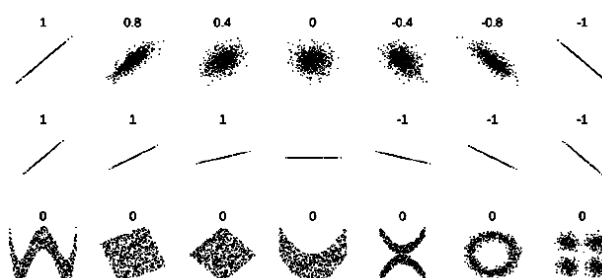


Рис. 4. Метод кореляції

### 1. Частотні методи

Ця група методів орієнтована на аналіз спектральних характеристик сигналу:

- **Спектральний аналіз:** виділення частотних компонентів сигналу за допомогою швидкого перетворення Фур'є (FFT) або вейвлет-аналізу.

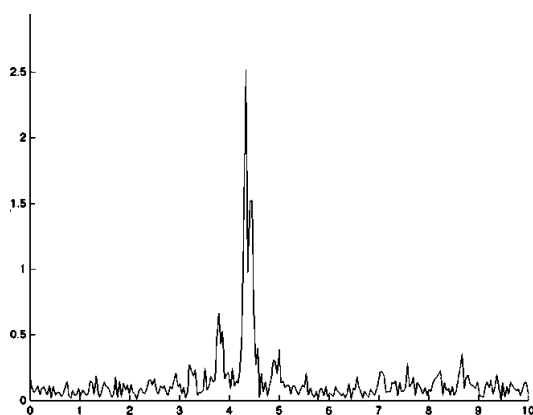


Рис. 5. Спектральний аналіз (перетворення Фур'є)

- **Аналіз частотної модуляції:** виявлення змін частоти сигналу для ідентифікації його джерела.

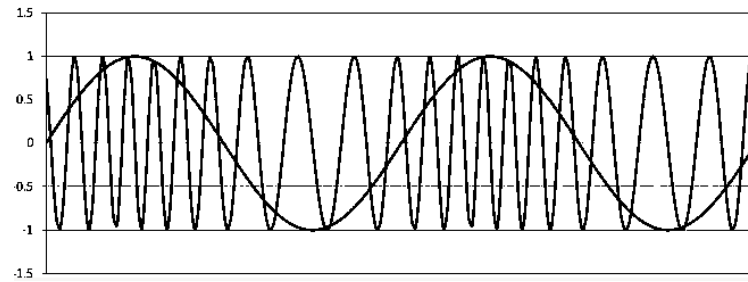


Рис. 6. Частотна модуляція

· **Методи часово-частотного аналізу:** обробка сигналів, що змінюються в часі, для отримання додаткової інформації.

## 2. Комбіновані методи

Ці методи інтегрують просторовий і частотний аналіз для отримання комплексної інформації про джерело:

· **Методи просторово-частотного орієнтування:** одночасне визначення положення джерела та його спектральних характеристик.

· **Методи на базі штучного інтелекту:** використання машинного навчання для автоматичної обробки просторових і частотних параметрів сигналів.

· **Системи багатоканальної обробки:** інтеграція даних з кількох антен для більш точної ідентифікації джерела.

Класифікація методів дає змогу обрати оптимальний підхід залежно від умов застосування та типу задач, що вирішуються у сфері радіоелектронної боротьби [2].

## Методи визначення просторових параметрів

Визначення просторових параметрів джерел радіоелектронної боротьби (РЕБ) є важливим завданням для локалізації джерел сигналів, оцінки їх активності та планування заходів протидії. У цьому розділі розглянуто основні підходи до вирішення цього завдання [2- 6].

### Використання антенних решіток та фазових методів

Антенні решітки є одним із найпоширеніших засобів визначення напрямку на джерело сигналу. Принцип роботи таких систем ґрунтується на вимірюванні фазових зсувів сигналів, які надходять на окремі елементи антенного масиву.

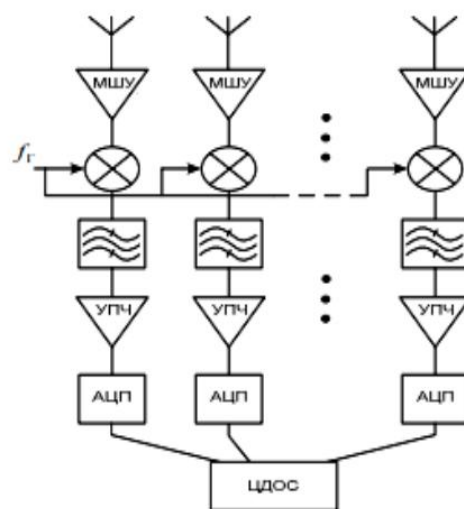


Рис. 7. Структура цифрової антенної решітки

### Фазові методи:

Ці методи доають змогу визначати азимут і кут місця джерела за допомогою обробки фазових різниць між сигналами, прийнятими елементами антенної решітки.

- **Переваги:** висока точність в умовах відсутності завад.
- **Недоліки:** чутливість до фазових похибок і необхідність складної апаратури.

### Адаптивні антенні решітки:

Вони використовують алгоритми цифрової обробки сигналів для динамічного налаштування характеристик спрямованості, що дає змогу підвищити точність і зменшити вплив завад [6- 8].

### Методи тріангуляції, часового аналізу та кореляційного підходу

#### 1. Методи тріангуляції.

Тріангуляція ґрунтується на використанні кількох приймальних пунктів для визначення положення джерела за геометричними розрахунками.

· **Принцип роботи:** визначення напрямків на джерело з кількох точок та перетин променів у просторі.

- **Переваги:** простота реалізації за наявності кількох приймачів.
- **Недоліки:** залежність точності від відстані між приймачами та їхньої геометрії.

#### 2. Методи часового аналізу.

Ці методи базуються на вимірюванні затримки сигналів між різними приймачами для визначення напрямку на джерело.

· **Принцип роботи:** аналіз часу приходу сигналу (Time of Arrival, ToA) або різниці часу приходу (Time Difference of Arrival, TDoA).

- **Переваги:** висока точність у випадку чітко синхронізованих приймачів.
- **Недоліки:** потреба у високоточному обладнанні для синхронізації.

#### 3. Кореляційний підхід.

Використовується для визначення просторових параметрів шляхом порівняння сигналів, прийнятих різними антенами.

· **Принцип роботи:** обчислення кореляційної функції між сигналами для оцінки їх часових або фазових зсувів.

- **Переваги:** ефективність у складних умовах із наявністю шумів.
- **Недоліки:** високе навантаження на обчислювальні ресурси.

### Оцінка точності та ефективності методів

Оцінка точності та ефективності методів визначення просторових параметрів залежить від кількох факторів:

· **Роздільна здатність:** здатність системи відокремлювати джерела, розташовані близько одне до одного.

- **Вплив завад:** стійкість методів до шумів та інших перешкод.
- **Обчислювальні витрати:** швидкість та ресурсоемність алгоритмів.
- **Апаратні обмеження:** точність вимірювальних пристроїв та якість антенних систем.

Загалом вибір методу визначення просторових параметрів залежить від умов застосування, доступних ресурсів та вимог до точності. Комбінування різних підходів може забезпечити оптимальний результат у складних радіоелектронних умовах [8].

### Методи визначення частотних параметрів

Визначення частотних параметрів джерел радіоелектронної боротьби (РЕБ) є важливим етапом для ідентифікації типу сигналу, виявлення модифікацій частоти, а також для оцінки активності джерела. Методи, що використовуються для аналізу частот, базуються на спектральному аналізі сигналів, який дає змогу отримати інформацію про частотні компоненти сигналу. У цьому розділі розглядаються основні підходи до визначення частотних параметрів джерел РЕБ [1- 4].

### **Спектральний аналіз та його роль у визначенні частот**

Спектральний аналіз є основним методом для виявлення частотних характеристик радіосигналів. Завдяки цьому підходу можна розкласти сигнал на окремі частотні компоненти, що дає змогу визначити частоту роботи джерела, його спектральну ширину та інші параметри. Основними методами спектрального аналізу є:

- **Фур'є-аналіз:** розкладання сигналу на гармонічні компоненти, що дає змогу отримати спектр сигналу.
- **Спектрограми:** графічне зображення частотних компонент сигналу в часі. Це дозволяє виявити зміни частоти та виявити наявність частотних модуляцій.
- **Спектральна щільність:** аналіз енергії сигналу на різних частотах, що важливо для виявлення характерних частот джерела РЕБ.

Спектральний аналіз має широке застосування в електронній боротьбі, оскільки дає змогу ідентифікувати типи сигналів, оцінити їх потужність на певних частотах, а також виявити зміну частоти сигналу, що може бути важливим для виявлення адаптивних або змінних джерел РЕБ.

### **Методи швидкого перетворення Фур'є (FFT), вейвлет-аналізу та їх застосування** **Швидке перетворення Фур'є (FFT)**

Швидке перетворення Фур'є є ефективним методом для аналізу частотних параметрів сигналів. Завдяки FFT можна отримати спектр сигналу за обмежений час, що робить цей метод особливо корисним у реальному часі [5- 6].

- **Переваги:** висока швидкість обробки, точність у визначенні частотних компонентів.
- **Недоліки:** можливі проблеми з роздільною здатністю у випадку сигналів з короткою тривалістю або з великою кількістю гармонічних компонентів.

### **Вейвлет-аналіз**

Вейвлет-аналіз є методом, який дає змогу проводити аналіз сигналів на різних рівнях роздільної здатності, що робить його дуже корисним для вивчення сигналів, що змінюються в часі або мають короткочасні компоненти. Вейвлети дозволяють одночасно аналізувати частотні та часові характеристики сигналу.

- **Переваги:** здатність працювати з сигналами, що мають змінні частотні компоненти, висока точність у виявленні швидких змін сигналів.
- **Недоліки:** складність реалізації та високе навантаження на обчислювальні ресурси.

### **Порівняння традиційних та сучасних підходів**

#### **Традиційні підходи**

Традиційні методи спектрального аналізу, такі як перетворення Фур'є, мають високу точність і ефективність у випадку стаціонарних сигналів, де частотні компоненти не змінюються швидко. Однак вони мають обмеження під час обробки сигналів, що змінюються в часі або містять множину частотних компонентів [8].

#### **Сучасні підходи**

Сучасні методи, такі як вейвлет-аналіз, пропонують більш гнучкі можливості для аналізу сигналів, що мають змінну частотну складову або короткочасні компоненти. Вони дають змогу покращити точність визначення частот, зокрема для складних сигналів РЕБ, таких як сигнали з частотною модуляцією або шуми.

- **Переваги сучасних методів:** здатність до обробки складних і змінних сигналів, висока точність за низького рівня завад.
- **Недоліки:** вища обчислювальна складність і потреба в складних алгоритмах для оптимізації обробки.

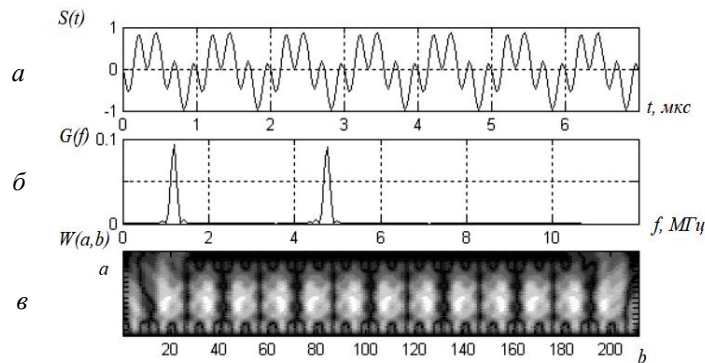


Рис. 8. Цифровий сигнал: а – представлення в часовій області;  
б – представлення в частотній області у разі використання перетворення Фур'є;  
в – представлення за допомогою вейвлет-спектра.

Загалом використання традиційних та сучасних підходів залежить від характеру сигналу та вимог до точності та швидкості аналізу. Для стаціонарних сигналів ефективніше використовувати методи, засновані на Фур'є, а для змінних чи короткочасних сигналів - вейвлет-аналіз [5].

#### Аналіз комбінованих методів

Комбіновані методи визначення параметрів джерел радіоелектронної боротьби (РЕБ) інтегрують різні підходи для одночасного аналізу просторових та частотних характеристик сигналів. Використання таких методів дає змогу досягти високої точності та ефективності під час виявлення та локалізації джерел РЕБ, а також покращити стійкість систем до завад і помилок в аналізі [6- 8].

#### Інтеграція просторових та частотних характеристик

Інтеграція просторових та частотних характеристик дає змогу створювати більш точні моделі для локалізації та ідентифікації джерел РЕБ. Такий підхід поєднує два основні типи аналізу:

- **Просторовий аналіз** фокусується на визначенні напрямку, відстані та місця розташування джерела за допомогою антенних решіток, методів тріангуляції, кореляції та часового аналізу.
- **Частотний аналіз** дає змогу виявляти частотні компоненти сигналу, що важливо для визначення роботи джерела на певних частотах, виявлення частотно-модуляційних характеристик та спектральних особливостей сигналу.

Інтеграція цих двох типів аналізу дозволяє створити комплексну картину радіоелектронного середовища, що дає змогу точно визначити місце розташування джерела, його спектральні характеристики та можливі варіанти протидії. Водночас комбіновані методи можуть використовувати різні алгоритми для обробки даних, наприклад, комбіноване застосування методів фазового визначення напрямку та спектрального аналізу для точнішої ідентифікації джерела.

#### Особливості роботи систем на базі штучного інтелекту

Системи, що використовують штучний інтелект (ШІ), здатні автоматично адаптуватися до змінюваних умов середовища та покращувати ефективність комбінованих методів. Вони можуть інтегрувати просторові та частотні параметри з використанням таких технологій, як машинне навчання, глибоке навчання та нейронні мережі.

- **Машинне навчання:** дозволяє системам навчатися на основі великих обсягів даних, оптимізувати параметри для виявлення джерел РЕБ, а також адаптуватися до нових умов роботи.
- **Глибоке навчання:** використання багаторівневих нейронних мереж дає змогу автоматично виділяти складні патерни в даних, що зібрані з різних сенсорів (наприклад, комбінація антенних та спектральних вимірювань).

- **Аналіз даних у реальному часі:** системи на базі ШІ здатні обробляти дані в реальному часі, забезпечуючи своєчасне виявлення та локалізацію джерел РЕБ, що є критичним для ефективної протидії.

Завдяки здатності ШІ до самонавчання та адаптації ці системи можуть значно зменшити час на обробку даних та підвищити точність виявлення, навіть у складних умовах радіоелектронного середовища [10- 11].

#### **Переваги та виклики комбінованих методів**

##### **Переваги комбінованих методів:**

- **Підвищена точність:** інтеграція просторового та частотного аналізу дає змогу отримати більш точні дані про джерело РЕБ, зменшуючи ймовірність помилок при локалізації та ідентифікації.

- **Змішане використання інформації:** комбіновані методи дозволяють використовувати різні типи даних (наприклад, від антенних решіток та спектральних аналізаторів), що забезпечує більш комплексне розуміння ситуації.

- **Адаптивність:** комбіновані методи, використовуючи алгоритми машинного навчання, можуть адаптуватися до нових умов та змінювати стратегії виявлення та локалізації джерел РЕБ залежно від зовнішніх факторів.

- **Покращення стійкості до завад:** завдяки інтеграції різних методів можна зменшити вплив радіоелектронних завад та шумів, що підвищує ефективність системи в умовах високої інтенсивності завад.

##### **Виклики комбінованих методів:**

- **Високі обчислювальні витрати:** інтеграція просторових та частотних характеристик потребує значних обчислювальних ресурсів для обробки великих обсягів даних у реальному часі.

- **Складність реалізації:** розробка комбінованих методів потребує висококваліфікованих спеціалістів, здатних інтегрувати різні типи алгоритмів та забезпечити їх ефективну роботу.

- **Залежність від точності сенсорів:** ефективність комбінованих методів залежить від якості та точності використовуваних сенсорів (антен, спектральних аналізаторів, приймачів сигналів), що може бути обмеженням у реальних умовах.

- **Проблеми із синхронізацією:** для досягнення найкращих результатів необхідна точна синхронізація різних вимірювальних приладів та сенсорів, що може бути складним завданням у складних радіоелектронних умовах.

Загалом комбіновані методи, особливо в поєднанні з технологіями штучного інтелекту, мають великий потенціал для підвищення ефективності виявлення та протидії джерелам РЕБ, однак вони потребують значних ресурсів для реалізації та оптимізації [9- 10].

#### **Порівняння методів**

Порівняння методів визначення просторових та частотних параметрів джерел радіоелектронної боротьби (РЕБ) є важливим етапом для вибору оптимальних підходів залежно від конкретних умов застосування. У цьому розділі проведено аналіз переваг і недоліків основних методів, а також надано рекомендації щодо їх вибору залежно від умов.

#### **Порівняння основних методів визначення просторових та частотних параметрів джерел РЕБ**

| Метод                              | Переваги                                                       | Недоліки                                                         |
|------------------------------------|----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| 1                                  | 2                                                              | 3                                                                |
| Фазовий метод<br>(антенні решітки) | Висока точність визначення напрямку, висока стійкість до завад | Чутливість до фазових похибок, необхідність складного обладнання |

Продовження табл.

| 1                                          | 2                                                                                                        | 3                                                                                           |
|--------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| Метод триангуляції                         | Простота реалізації, достатня точність в умовах наявності кількох приймачів                              | Зниження точності у разі великих відстаней, залежність від геометрії розташування приймачів |
| Часовий аналіз (TDoA, ToA)                 | Висока точність визначення місцезнаходження, можливість роботи в реальному часі                          | Потребує чіткої синхронізації між приймачами, високе навантаження на апаратуру              |
| Метод швидкого перетворення Фур'є (FFT)    | Висока швидкість обробки сигналів, точність виявлення частотних компонентів                              | Можливі проблеми з роздільною здатністю для короткочасних або складних сигналів             |
| Вейвлет-аналіз                             | Гнучкість в обробці сигналів з різними частотними компонентами, точність визначення швидких змін сигналу | Високе навантаження на ресурси, складність реалізації                                       |
| Комбіновані методи (просторові + частотні) | Підвищена точність та стійкість до завад, комплексний підхід до аналізу сигналів                         | Високі обчислювальні витрати, складність інтеграції різних типів даних                      |

### Рекомендації щодо вибору методів залежно від умов застосування

Вибір методу для визначення параметрів джерел РЕБ залежить від кількох факторів: тип сигналу, вимоги до точності, доступні обчислювальні ресурси та умови операційного середовища. Ось кілька загальних рекомендацій [12]:

- Для стаціонарних сигналів з чіткими характеристиками, де важлива висока точність і мінімальні обчислювальні витрати, можна використовувати фазовий метод або метод триангуляції.
- Для складних сигналів, що мають змінні частотні характеристики або короткочасні компоненти, бажано застосовувати вейвлет-аналіз або швидке перетворення Фур'є для точнішого визначення частот.
- Для високоточних задач, де необхідно враховувати як просторові, так і частотні параметри, оптимальним вибором є комбіновані методи, які використовують як спектральний, так і просторовий аналіз.
- Для реального часу та ситуацій з високою інтенсивністю завад рекомендується використовувати методи, що поєднують просторовий аналіз з штучним інтелектом, що дає змогу знижувати вплив шумів та автоматично коригувати параметри аналізу.

Загалом вибір методу залежить від специфічних вимог до точності, швидкості обробки даних та умов середовища. Комбіновані методи, незважаючи на високе навантаження на обчислювальні ресурси, є найефективнішими для складних сценаріїв [13].

### Результати досліджень

У результаті проведеного аналізу методів визначення просторових і частотних параметрів джерел радіоелектронної боротьби (РЕБ) були отримані такі основні висновки. На основі огляду наукових джерел здійснено класифікацію методів визначення параметрів джерел РЕБ. Методи розподілено на три основні групи: методи визначення просторових параметрів, що включають антенні решітки, фазові методи, триангуляцію та кореляційний аналіз, методи визначення частотних параметрів, такі як спектральний аналіз із використанням швидкого перетворення Фур'є (FFT) та вейвлет-аналіз, а також комбіновані методи, що інтегрують просторовий і частотний аналіз, зокрема із залученням алгоритмів штучного інтелекту.

Аналіз показав, що для точного визначення положення джерел РЕБ найбільш ефективними є методи на основі антенних решіток, які забезпечують високу точність вимірювання завдяки вико-

ристанню багатоканальних приймачів і фазових антен, фазові методи, що дають змогу визначати напрямок на джерело сигналу шляхом аналізу фазових зсувів, триангуляційні методи, які базуються на вимірюванні часу прибуття сигналу до кількох приймачів, а також кореляційний аналіз, що дозволяє знаходити кореляції між прийнятими сигналами на різних антенах.

Серед методів аналізу частотних параметрів джерел РЕБ виділено швидке перетворення Фур'є (FFT), яке є ефективним методом розкладу сигналів у частотній області та дає змогу визначати спектральний склад сигналу, вейвлет-аналіз, завдяки якому можна аналізувати сигнали в різних масштабах і корисний під час дослідження нестабільних або імпульсних сигналів, а також автокореляційний аналіз, який допомагає виявляти повторювані структури в сигналі та використовується під час роботи з імпульсними завадами.

Розглянуто підходи, що поєднують просторовий та частотний аналіз. Зокрема, застосування алгоритмів машинного навчання для обробки даних з антенних решіток та спектрального аналізу, використання адаптивних фільтрів для точного відокремлення корисного сигналу від перешкод у широкому спектральному діапазоні, а також гібридні методи, що комбінують фазові методи з кореляційним аналізом для підвищення точності локалізації джерел.

На основі проведеного дослідження виконано порівняльний аналіз методів за такими критеріями, як точність, швидкість обробки, необхідні обчислювальні ресурси та стійкість до перешкод. Встановлено, що комбіновані методи демонструють найкращі результати завдяки інтеграції різних підходів. Проведене дослідження дало змогу виявити переваги та недоліки різних методів визначення параметрів джерел РЕБ. Використання комбінованих підходів є перспективним напрямом розвитку, оскільки дозволяє підвищити точність та швидкість аналізу. Отримані результати можуть бути використані для вдосконалення систем радіоелектронного моніторингу й захисту.

### Висновки

У результаті проведеного дослідження встановлено, що визначення просторових і частотних параметрів джерел радіоелектронної боротьби є складним завданням, яке потребує використання різних методів та їх комбінацій. Просторові методи, зокрема фазовий метод, метод триангуляції та кореляційний аналіз, дають змогу отримувати точні координати джерел випромінювання, однак вони мають певні обмеження, пов'язані з необхідністю точного калібрування системи та чутливістю до завад. Частотні методи, серед яких спектральний аналіз та вейвлет-аналіз, ефективні для виявлення характеристик сигналу, однак їх застосування потребує значних обчислювальних ресурсів.

Аналіз сучасних тенденцій у розвитку методів визначення параметрів джерел РЕБ свідчить про зростаючу роль комбінованих підходів, які інтегрують просторовий та частотний аналіз. Такі методи забезпечують вищу точність визначення місцезнаходження та параметрів сигналів завдяки комплексному аналізу інформації, отриманої з різних джерел. Впровадження алгоритмів штучного інтелекту та машинного навчання у процес обробки сигналів відкриває нові можливості для підвищення швидкості та точності аналізу, особливо у складних радіоелектронних умовах.

#### Визначення перспектив подальших досліджень у цій галузі

Подальші дослідження в галузі визначення параметрів джерел РЕБ мають бути зосереджені на таких аспектах:

- розвиток комбінованих методів, які поєднують просторові та частотні підходи з новітніми технологіями штучного інтелекту для автоматичного аналізу великих обсягів даних і підвищення точності в реальному часі;
- оптимізація алгоритмів обробки даних, зокрема з використанням методів глибокого навчання для покращення роздільної здатності в складних умовах, таких як високий рівень завад або швидка зміна характеристик сигналу;
- розробка нових сенсорів та антенних решіток, здатних працювати в широкому діапазоні частот та забезпечувати більшу точність вимірювань;

- створення моделей радіоелектронного середовища, які передбачають не лише традиційні методи, але й адаптивні підходи до роботи в умовах швидких змін навколишнього середовища та динамічних загроз.

### **Рекомендації щодо розвитку методів для сучасних умов радіоелектронної боротьби**

Для забезпечення ефективної протидії джерелам РЕБ в сучасних умовах необхідно враховувати:

- Інтеграцію нових технологій: варто інвестувати в розробку та впровадження методів, що поєднують просторові та частотні аналізи, з використанням алгоритмів штучного інтелекту для адаптивного підходу до змінюваних умов.
- Оптимізацію обчислювальних ресурсів: для забезпечення реального часу обробки даних необхідно розробити більш ефективні алгоритми, здатні працювати на менш потужних обчислювальних платформах без втрати точності.
- Забезпечення високої стійкості до завад: для підвищення ефективності систем важливо впроваджувати методи, які знижують вплив радіоелектронних завад, зокрема, застосовувати комбіновані методи з використанням додаткових сенсорів, що дають змогу отримати більш точні дані за складних умов.
- Підвищення точності вимірювань: необхідно удосконалити технічні засоби, такі як антенні решітки та приймачі, для покращення точності як у просторі, так і в частотному діапазоні.

Отже, для ефективної боротьби з джерелами РЕБ в майбутньому необхідно зосередитись на розвитку інноваційних методів, які забезпечать високу точність, адаптивність та стійкість до завад, а також інтеграцію новітніх технологій штучного інтелекту та обчислювальних алгоритмів.

### **Список літератури**

1. Войтенко В. І. *Основи радіоелектронної боротьби*. Київ : Армія України, 2018. 320 с. URL: <https://lib.ua.edu/reb-basics>.
2. Єгоров В. С. Спосіб однопозиційного визначення координат радіовипромінювальних засобів. *Сучасний захист інформації*. 2020. (4). 42- 47. Doi: 10.31673/2409-7292.2020.042327.
3. Попович О. М. *Аналіз спектральних методів в радіоелектронній боротьбі*. Львів : Львівська політехніка, 2020. 280 с. URL: <https://library.lpnu.ua/spectral-analysis>.
4. Skolnik M. I. *Introduction to Radar Systems*. 3rd ed. New York : McGraw-Hill, 2001. 768 p. URL: <https://radarsys.edu/skolnik>.
5. Wiley R. G. *Electronic Intelligence: The Analysis of Radar Signals*. Norwood : Artech House, 2006. 504 p. URL: <https://www.artechhouse.com/electronic-intel>.
6. Stallings W. *Wireless Communications and Networks*. 2nd ed. Upper Saddle River : Prentice Hall, 2005. 584 p.
7. Balanis C. A. *Antenna Theory: Analysis and Design (4th ed.)*. Hoboken : Wiley, 2016. Doi: 10.1002/9781119176831.
8. Kudov H. V., Kostiantets O. V., Kovalenko O. V., Maslenko O. V., Solomonenko Y. S. Using Software-Defender radio receivers for determining the coordinates of low-visible aerial objects. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023. 2(9). 88- 97. Doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.286466>.
9. Balanis C. A. *Antenna Theory: Analysis and Design*. 4th ed. Hoboken : Wiley, 2016. 1104 p. URL: <https://antenna-theory.com>.
10. Mailloux R. J. *Phased Array Antenna Handbook*. 2nd ed. Norwood : Artech House, 2005. 500 p. URL: <https://phasedarrayhandbook.com>.
11. Opirskyy I., Bybyk R. Research on modern methods of Electronic Warfare (EW) and methods and means of its counteraction. *Ukrainian Scientific Journal of Information Security*. 2023. Vol. 29, Issue 2. Pp. 88- 97. Doi: <https://doi.org/10.18372/2225-5036.29.17873>.
12. Mark Montrose *Introduction to EMI/EMC Design for Printed Circuit Boards*. URL: [https:// 6146am.com.br/wp-content/uploads/2022/04/Intro\\_EMC\\_Printed\\_Circuit\\_Board\\_Montrose.pdf](https://6146am.com.br/wp-content/uploads/2022/04/Intro_EMC_Printed_Circuit_Board_Montrose.pdf).

13. McPeak W. M. et al. *Design of nanostructured metamaterials for optical magnetometry*. *Nature materials*. 2015. 14.4. Pp. 395- 400. URL: <https://www.nature.com/articles/nmat4221>.
14. Adamczyk B. *Foundations of Electromagnetic Compatibility: with Practical Applications*. 2017. Pp.439- 452. Doi: <https://doi.org/10.1002/9781119120810.ch15>.

## RESEARCH OF EXISTING METHODS FOR DETERMINING SPATIAL AND FREQUENCY PARAMETERS OF ELECTRONIC WARFARE (EW) SOURCES

R. T. Bybyk, Y. M. Nakonechnyi

Lviv Polytechnic National University,  
Department of Information Protection

© Bybyk R. T., Nakonechnyi Y. M., 2025

Modern approaches to determining the spatial and frequency parameters of electronic warfare (EW) sources, which are crucial for ensuring the efficiency of electronic intelligence, defense, and countermeasures systems, have been studied. A classification of existing methods, covering spatial, frequency, and combined approaches, has been conducted. The features of using antenna systems, phase methods, triangulation, and correlation analysis to determine the spatial characteristics of sources have been considered. Spectral methods, including Fast Fourier Transform (FFT) and wavelet analysis, for identifying frequency parameters of signals have been analyzed. Particular attention is paid to combined methods that integrate spatial and frequency analysis, as well as their application in modern electronic warfare conditions using artificial intelligence-based systems. The main advantages and limitations of each approach have been identified, and recommendations for their selection depending on tasks and usage conditions are provided. The materials of the article may be useful for developers of electronic monitoring and warfare systems, as well as for specialists engaged in research and implementation of advanced technologies in this field.

**Keywords:** electronic warfare, spatial parameters, frequency parameters, antenna systems, spectral analysis, combined methods, artificial intelligence.