

ДОСЛІДЖЕННЯ АЛГОРИТМІВ ПРОСТОРОВО-ЧАСТОТНОГО АНАЛІЗУ ДЛЯ ПРОТИДІЇ ЗАГРОЗАМ РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ БОРОТЬБИ(РЕБ)

У статті досліджуються алгоритми просторово-частотного аналізу, які є важливим інструментом для протидії загрозам радіоелектронної боротьби (РЕБ). РЕБ на сьогоднішній день є однією з основних складових сучасних військових конфліктів, що потребує розробки новітніх методів та підходів до виявлення та нейтралізації радіоелектронних засобів противника. Основну увагу в роботі приділено принципам просторово-частотного аналізу, що включають використання як просторової, так і частотної інформації для виявлення і локалізації джерел РЕБ. Розглянуто основні алгоритми, які застосовуються для обробки сигналів в умовах РЕБ, зокрема методи фільтрації, детекції та розпізнавання радіоелектронних засобів. У статті здійснено порівняння різних методів просторово-частотного аналізу на основі їх ефективності та здатності до роботи в умовах перешкод і маскування сигналів. Особливу увагу звернено на алгоритми, які дозволяють знижувати вплив шуму та перешкод на точність розпізнавання, а також підвищувати ефективність виявлення радіоелектронних джерел, що використовують складні методи маскування. Досліджуються й новітні підходи в області алгоритмів просторово-частотного аналізу, що дозволяють інтегрувати кілька методів обробки сигналів для досягнення більш високої точності виявлення та нейтралізації загроз РЕБ. Окрім теоретичних аспектів, в статті наведено аналіз практичного застосування цих алгоритмів у реальних умовах, включаючи військові операції та захист критичної інфраструктури. Розглянуто перспективи розвитку даної галузі, зокрема в контексті вдосконалення існуючих алгоритмів, адаптації до нових типів загроз та інтеграції з іншими системами оборони. Робота є актуальною в умовах постійного розвитку технологій РЕБ та їх застосування в сучасних збройних конфліктах, оскільки вона надає глибоке розуміння принципів просторово-частотного аналізу та можливості їх використання для підвищення ефективності систем протидії загрозам РЕБ.

Ключові слова: радіоелектронна боротьба (РЕБ), просторово-частотний аналіз, алгоритми обробки сигналів, виявлення джерел РЕБ, методи нейтралізації загроз, технології РЕБ, сигналознавство, обробка даних, електронне придушення, просторово-частотне розпізнавання, ефективність алгоритмів, інтеграція алгоритмів, військова оборона, захист критичної інфраструктури.

Вступ

У сучасних умовах глобальної безпеки та на тлі швидкого розвитку технологій радіоелектронної боротьби (РЕБ) ця сфера стає одним із основних напрямів боротьби в рамках військових конфліктів, а також захисту критично важливих об'єктів від зовнішніх загроз. РЕБ включає в себе широкий спектр заходів, спрямованих на порушення або нейтралізацію роботи радіоелектронних систем супротивника, зокрема засобів зв'язку, радарів та навігаційних систем. У зв'язку з постійним розвитком засобів маскування сигналів, технічних засобів перешкод і складних методів управління радіоелектронними системами, ефективність традиційних методів боротьби виявляється обмеженою. Однак, завдяки використанню передових алгоритмів просторово-частотного аналізу, які дозволяють поєднувати інформацію як про просторове розташування, так і про частотні характеристики сигналів, з'являється нова можливість для покращення процесу виявлення і локалізації джерел радіоелектронного впливу. Просторово-частотний аналіз має великий потенціал у підвищенні ефективності виявлення загроз РЕБ, що робить дослідження алгоритмів цієї галузі надзвичайно актуальним і необхідним для розвитку засобів боротьби з новітніми типами електронних загроз.

Аналіз літературних джерел та формулювання проблеми

У сучасних умовах ведення радіоелектронної боротьби (РЕБ) значна увага приділяється методам та алгоритмам просторово-частотного аналізу, які дозволяють ефективно ідентифікувати, локалізувати та нейтралізувати ворожі джерела радіовипромінювання. Аналіз наукових досліджень показує, що ця проблема розглядається у працях багатьох вітчизняних і зарубіжних учених, які вивчають методи обробки сигналів, алгоритми виявлення джерел перешкод, а також принципи функціонування когнітивних радіосистем.

Зокрема, у роботах [1, 2] розглядаються основні принципи РЕБ, механізми створення активних та пасивних перешкод, а також ефективність традиційних методів частотного

аналізу (FFT, MUSIC, ESPRIT). Дослідження показують, що ці алгоритми широко використовуються для визначення параметрів джерел випромінювання, але мають низку обмежень, пов'язаних із чутливістю до перешкод, високими обчислювальними витратами та складністю адаптації до змінних умов.

У дослідженнях [3, 4] акцент зроблено на адаптивних алгоритмах обробки сигналів, зокрема методах beamforming та просторово-часової фільтрації. Ці підходи дозволяють значно підвищити стійкість до завад, проте їх ефективність залежить від характеристик антенних решіток і точності оцінки параметрів сигналів.

Окрему увагу приділено застосуванню методів штучного інтелекту та машинного навчання для автоматизованого аналізу радіосигналів [5, 6]. Використання нейронних мереж та глибокого навчання дозволяє підвищити точність розпізнавання сигналів у складних умовах, однак такі методи потребують значних обчислювальних ресурсів та навчання на великому обсязі даних.

Попри значний прогрес у сфері аналізу сигналів, залишається низка проблем, які потребують вирішення:

- Недостатня стійкість традиційних методів аналізу до складних багатосигнальних сценаріїв та адаптивних перешкод.
- Високі обчислювальні витрати, які обмежують можливості використання алгоритмів у реальному часі.
- Обмежені можливості традиційних методів щодо адаптації до змінних умов РЕБ-середовища.
- Потреба у створенні ефективних гібридних підходів, що поєднують класичні методи спектрального аналізу з інноваційними технологіями штучного інтелекту.

Отже, формулювання проблеми полягає в розробці та оптимізації алгоритмів просторово-частотного аналізу, які забезпечать високу точність, швидкодію та стійкість до перешкод, а також дозволять ефективно ідентифікувати та нейтралізувати загрози РЕБ. У перспективі це сприятиме покращенню роботи радіоелектронних систем і підвищенню рівня захищеності від електромагнітного впливу противника.

Мета та завдання дослідження

Метою даного дослідження є вивчення та порівняння алгоритмів просторово-частотного аналізу для протидії загрозам РЕБ, а також оцінка їх ефективності в умовах сучасної військової та цивільної електронної боротьби. Завданнями дослідження є:

Аналіз теоретичних основ просторово-частотного аналізу в контексті РЕБ, зокрема, визначення його ролі в системах виявлення та нейтралізації радіоелектронних засобів.

1. Огляд та класифікація існуючих алгоритмів просторово-частотного аналізу, що застосовуються для виявлення та знищення загроз РЕБ.
2. Порівняння ефективності цих алгоритмів у різних умовах: при високому рівні шуму, перешкод, маскуванні сигналу, а також в умовах високої мобільності та динамічних змін спектра сигналів.
3. Оцінка можливості інтеграції різних алгоритмів для досягнення більш точного і швидкого виявлення загроз.
4. Визначення перспектив подальшого розвитку та вдосконалення методів просторово-частотного аналізу з урахуванням новітніх тенденцій у галузі РЕБ.

Результати дослідження

4.1 Основи радіоелектронної боротьби (РЕБ). Радіоелектронна боротьба (РЕБ) є важливим компонентом сучасної військової тактики і стратегії, що спрямована на

нейтралізацію, порушення або спотворення радіоелектронних систем противника. Загрози РЕБ мають різноманітний характер і охоплюють як активні, так і пасивні методи атаки. Вони включають в себе порушення роботи радіоелектронних засобів, таких як радіолокаційні станції, системи зв'язку, навігаційні системи та інші компоненти військової інфраструктури, що використовують радіочастотний спектр для передачі сигналів[1][2][4].

Активні загрози РЕБ мають на меті безпосередньо порушити або повністю знищити роботу ворожих радіоелектронних засобів. Основним методом є джемінг (генерація перешкод на радіочастотах, що використовуються противником), що блокує нормальну роботу радіоелектронних пристроїв. Джемінг може бути реалізований як широкосмуговий, так і вузькосмуговий. У випадку широкосмугового джемінгу намагаються блокувати цілий діапазон частот, що використовуються для передачі сигналів, тоді як вузькосмуговий джемінг зосереджений на блокуванні конкретних каналів зв'язку або конкретних частот, що застосовуються противником.

Пасивні загрози РЕБ спрямовані на спостереження, перехоплення і аналіз сигналів, які передаються в ефірі. Вони не включають активне генерування перешкод, але дають можливість супротивнику здійснювати контроль за електронними системами і системами зв'язку без виявлення себе. В цьому контексті важливу роль відіграють технології для перехоплення сигналів, що дозволяють отримати розвідувальну інформацію або зламати захист супротивника, а також для імітації джерел сигналів з метою дезорієнтації противника[4].

Загрози можуть включати не тільки атаки на військові об'єкти, а й на цивільну інфраструктуру, де вразливими є системи критичного значення, такі як мережі енергозабезпечення, системи управління транспорту, комунікації, що можуть бути порушені або знищені за допомогою радіоелектронних засобів.

Протидія загрозам РЕБ базується на використанні спеціалізованих засобів і методів, що дозволяють нейтралізувати або мінімізувати вплив радіоелектронних атак на критично важливі системи. Основні принципи протидії включають в себе маскування, ідентифікацію загроз, їх локалізацію та прийняття відповідних контрзаходів.

Маскування є одним із основних методів протидії РЕБ. За допомогою маскування можна знизити виявлення радіоелектронних сигналів або змінити їх характеристики таким чином, щоб вони ставали непомітними для ворожих засобів. Маскування може бути реалізовано через зміни частотного спектру, використання спеціальних захисних покриттів для зменшення випромінювання або застосування методів динамічного зміщення сигналу[5].

Ідентифікація та локалізація загроз є важливою частиною протидії РЕБ, оскільки без своєчасного виявлення джерела загрози неможливо ефективно захистити об'єкти та системи. Для цього використовуються методи просторово-частотного аналізу, що дозволяють точно ідентифікувати розташування джерела перешкоди за допомогою вимірювання амплітудних, частотних та просторових характеристик сигналу.

Адаптивні алгоритми протидії використовуються для автоматичного налаштування систем на зміни умов РЕБ. Такі алгоритми дозволяють оперативно реагувати на нові типи загроз та змінювати параметри системи, щоб зберегти стабільність зв'язку та нормальну роботу радіоелектронних засобів. Системи автоматичного налаштування здатні не тільки знижувати вплив перешкод, але й прогнозувати можливі атаки, що підвищує загальну ефективність протидії.

Сучасний захист від РЕБ вимагає комплексного підходу, що включає інтеграцію різноманітних технологій та методів для забезпечення цілісного захисту від радіоелектронних атак. Одним із важливих аспектів є розробка комплексних систем захисту, які поєднують декілька методів протидії РЕБ: від виявлення перешкод до здійснення активного електронного придушення[1].

Інтеграція систем протидії дозволяє створити єдину мережу захисту, яка включає не тільки захист радіоелектронних засобів, а й системи для моніторингу та аналізу електронного простору. Системи кіберзахисту також є важливою частиною цієї інтеграції, оскільки сучасні загрози РЕБ часто супроводжуються кібернетичними атаками, що порушують нормальну роботу системи.

Використання технологій штучного інтелекту (ШІ) у системах протидії РЕБ дозволяє автоматизувати процес виявлення, ідентифікації та нейтралізації загроз. ШІ здатен швидко аналізувати великі об'єми даних, що надходять від різних сенсорів, виявляти аномалії, прогнозувати загрози та розраховувати найбільш ефективні контрзаходи. Це значно підвищує ефективність оборонних систем, особливо в умовах постійно змінюваної радіоелектронної обстановки.

Мобільні та безпілотні платформи також використовуються для захисту від РЕБ. Безпілотники можуть оперативно розгорнути електронні засоби для блокування сигналів супротивника або для виявлення джерел перешкод, що забезпечує гнучкість і швидкість реагування на змінні обставини. Крім того, безпілотники можуть працювати в умовах, де людські сили чи традиційні платформи будуть уразливі до РЕБ.

Протидія багатоканальним загрозам є важливим напрямком, оскільки супротивники можуть використовувати складні комбінації перешкод для блокування або спотворення сигналів. Використання адаптивних фільтрів та мультиспектральних систем дозволяє ефективно протистояти таким складним загрозам, знижуючи рівень перешкод у багатьох каналах одночасно.

Таким чином, захист від РЕБ вимагає постійного вдосконалення технологій, інтеграції нових підходів і гнучкого реагування на виникаючі загрози, що є ключовим для забезпечення національної безпеки та оборони в умовах сучасних військових конфліктів[3][4].

4.2 Просторово-частотний аналіз в контексті РЕБ. Просторово-частотний аналіз є одним із ключових методів обробки радіоелектронних сигналів у сфері радіоелектронної боротьби (РЕБ). Він дозволяє ідентифікувати, локалізувати та класифікувати джерела випромінювання, що є критично важливим для виявлення загроз і розробки ефективних заходів протидії. Просторово-частотний аналіз дозволяє оцінити не лише спектральні характеристики сигналів, а й визначити їх розташування у просторі, що забезпечує можливість точкового придушення або обходу ворожих перешкод.

Просторово-частотний аналіз ґрунтується на одночасному розгляді сигналів у двох вимірах: частотному та просторовому. Це дозволяє виявляти не лише спектральні особливості випромінювань, а й визначати напрямок їхнього розповсюдження. Основою цього підходу є використання масивів антен (антенних решіток), які дозволяють формувати діаграми спрямованості, визначати азимут та кут місця джерела випромінювання, а також аналізувати зміну частотного спектра залежно від положення передавача чи приймача.

У процесі просторово-частотного аналізу широко використовуються методи спектральної оцінки, такі як швидке перетворення Фур'є (FFT), методи високої роздільної здатності (наприклад, MUSIC і ESPRIT), а також адаптивні алгоритми обробки сигналів. Високоточна локалізація джерел перешкод є можливою завдяки використанню фазового аналізу, часової кореляції сигналів та адаптивного фільтрування[7].

Одним із ключових інструментів у просторово-частотному аналізі є адаптивні антенні решітки. Вони здатні змінювати характеристики випромінювання та прийому залежно від умов радіоелектронної обстановки, що дозволяє ефективно фільтрувати корисні сигнали від перешкод і створювати "нулі" у діаграмі спрямованості для подавлення ворожих випромінювань.

При послідовному збудженні фазованої антенної решітки її випромінювальні елементи з'єднуються послідовно і розміщуються на все більшому віддаленні від точки живлення. Решітка з послідовним збудженням і крайовим (кінцевим) живленням зображена на Рисунок

2. Решітка з центральним живленням може розглядатися як дві решітки з крайовим живленням. Решітки з послідовним збудженням є чутливими до частоти випромінювання, що призводить до обмеження їх смуги частот.

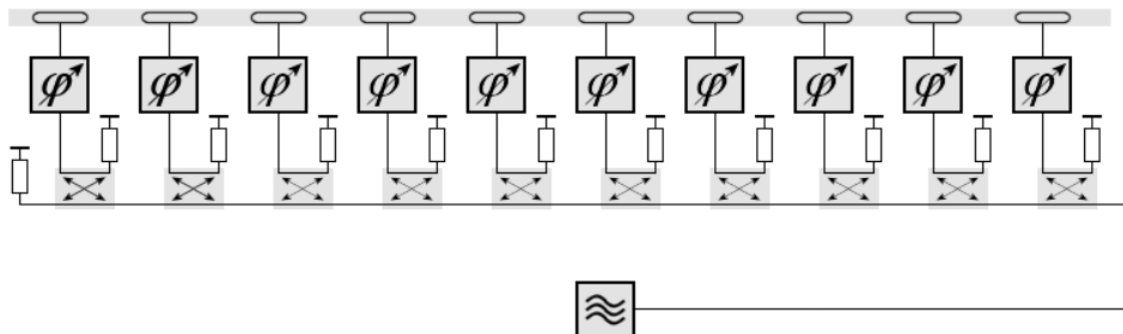


Рис. 1. Фазована решітка з послідовним збудженням та крайовим живленням

При зміні частоти випромінювання фаза сигналів на вході випромінювальних елементів змінюється пропорційно довжині лінії живлення так, що фазовий фронт на апертурі повертається і, таким чином, промінь антени сканує. Цей ефект є корисним для решіток з частотним скануванням, однак в решті випадків він є небажаним. Збільшена електрична довжина тракту до кожного випромінювального елемента має розраховуватися як функція частоти і враховуватися при управлінні фазообертачами.

При зміні частоти фазовий зсув кожного фазообертача має перераховуватися наново (або, як це частіше робиться на практиці, необхідно перейти на іншу таблицю фазових зсувів) (рис.1).

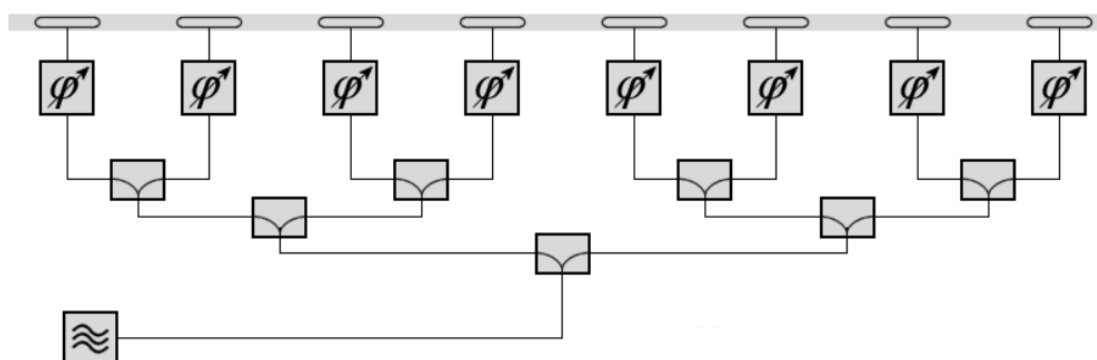


Рис. 2. Паралельне збудження фазованої решітки

При паралельному збудженні лінії живлення всіх випромінювальних елементів однакові, тому випромінювана потужність подається на них з однаковою фазою. Окремим випадком антенної решітки з паралельним збудженням є схема типу «ялинка», представлена на Рисунку 3. В даному випадку випромінювана потужність покаскадно ділиться пополам. Змінення частоти не впливає на величину різниці фаз сигналу між випромінювальними елементами. Це дає перевагу, яка полягає в тому, що при обчисленнях величин фазових зсувів можливо не враховувати довжину ліній живлення. Така перевага важлива у разі стрибкоподібного зміння частоти, а також забезпечує реалізацію багаточастотного зондування і стискання сигналів (рис.2). Просторове (оптичне) збудження може розглядатися як дещо середнє між паралельним збудженням і послідовним збудженням з центральним живленням. При дуже великій фокусній відстані просторове збудження наближається до паралельного збудження. При дуже короткій фокусній відстані просторове збудження наближається до послідовного

збудження з центральним живленням, оскільки в такому випадку відстань від опромінювача до окремих випромінювальних елементів решітки суттєво відрізняються.

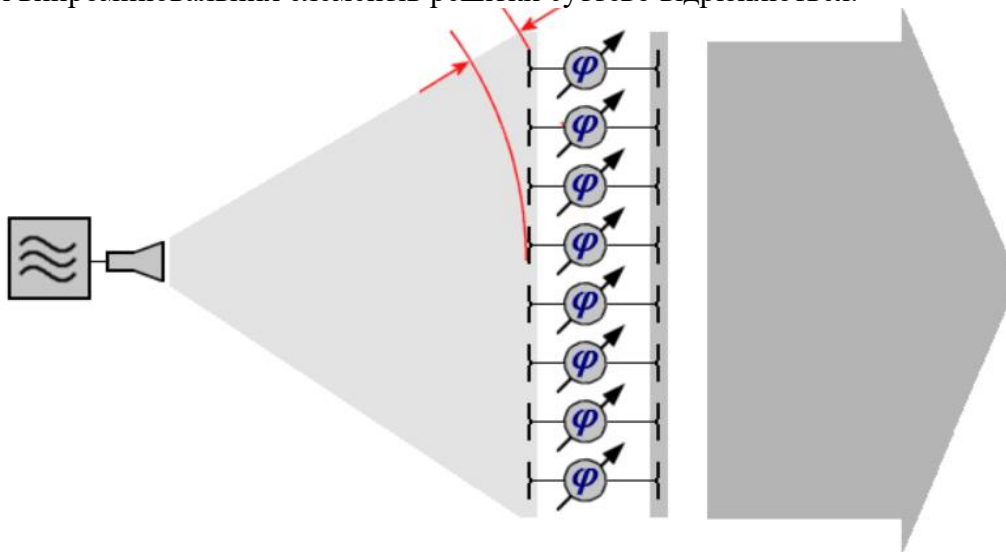


Рис. 3. Просторове збудження випромінювального типу

В решітках випромінювального типу опромінювач (первинний випромінювач) розміщується позаду решітки, яка в даному випадку відіграє роль лінзи. Таким чином, опромінювач не створює затінення полотна антенної решітки. Фазована антенна решітка з просторовим збудженням випромінювального типу використовується в радіолокаторі зенітної ракетної системи «Patriot» (рис.3).

Іншим важливим аспектом є доплерівський аналіз, який дозволяє оцінити швидкість руху джерела сигналу відносно приймача. Це особливо корисно в умовах мобільних бойових дій, де рухомі джерела перешкод можуть швидко змінювати положення. Доплерівський ефект дозволяє прогнозувати траєкторію руху противника та адаптувати контрзаходи в реальному часі.

Розвиток радіоелектронної боротьби змушує сторони конфлікту шукати все складніші методи створення перешкод. Це зумовлює необхідність застосування просторово-частотного аналізу як засобу адаптивного захисту. Завдяки цьому методу можна не тільки розпізнати джерела завад, а й виділити їхні характеристики, що дозволяє обирати найбільш ефективні способи протидії[7][8].

Важливість просторово-частотного аналізу для протидії загрозам РЕБ

Застосування просторово-частотного аналізу дозволяє:

- Визначати джерела радіоперешкод у просторі. Це дає можливість здійснювати точкові удари або блокувати сигнали супротивника шляхом спрямованого радіоелектронного придушення.
- Фільтрувати корисні сигнали від перешкод. Наприклад, адаптивні антени можуть виділяти власні сигнали, придушуючи чужі.
- Прогнозувати можливі атаки. Моніторинг змін у спектрально-просторових характеристиках сигналів дозволяє виявляти підготовку до атак і здійснювати превентивні заходи.
- Адаптивно налаштовувати системи захисту. Використання ШІ та машинного навчання дозволяє системам самостійно підлаштовуватися під змінні умови та прогнозувати нові типи загроз.

Просторово-частотний аналіз також є важливим у боротьбі з такими загрозами, як "стелс"-технології. Сучасні радіолокаційні системи, засновані на методах багатоканального аналізу, можуть ефективно виявляти малопомітні цілі, використовуючи обробку сигналів у кількох діапазонах частот і напрямках[6].

Основні методи просторово-частотного аналізу

Існує кілька основних підходів до реалізації просторово-частотного аналізу, які відрізняються за точністю, швидкістю обробки та апаратними вимогами.

- Методи спектрального аналізу:

Швидке перетворення Фур'є (FFT) – використовується для розкладання сигналів у частотній області, що дозволяє визначати складові частоти перешкод і корисних сигналів (рис.4).

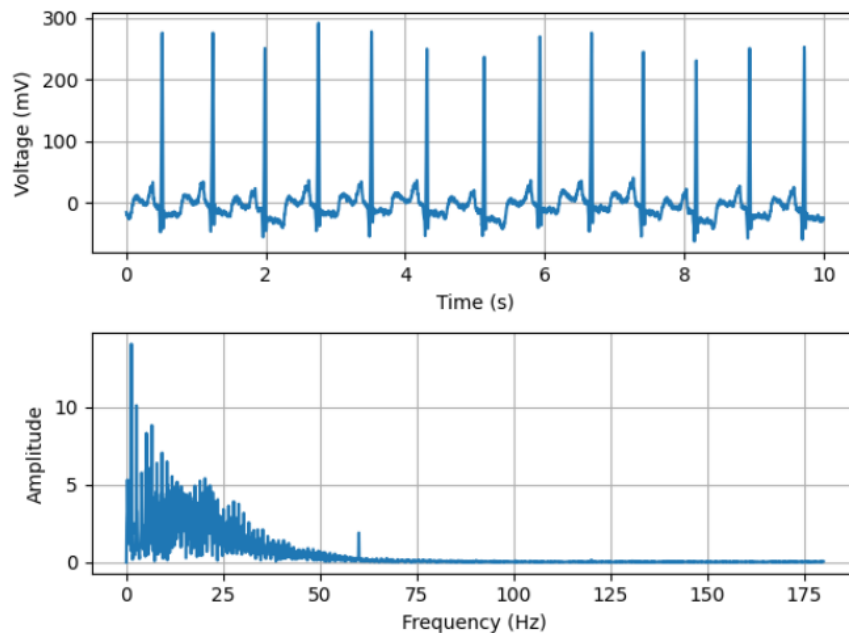


Рис. 4. Спектральний аналіз(перетворення Фур'є)

На рисунку 4 показаний сигнал у часовій області (Voltage vs. Time), а на нижньому – його спектральне представлення у частотній області (Amplitude vs. Frequency). Такий аналіз дозволяє визначити частоти, які складають сигнал, що корисно для виявлення перешкод та корисних компонентів у радіоелектронній боротьбі (РЕБ).

Автокореляційний аналіз – дозволяє виявляти повторювані структури сигналів, що корисно при роботі з періодичними імпульсними завадами (рис.5).

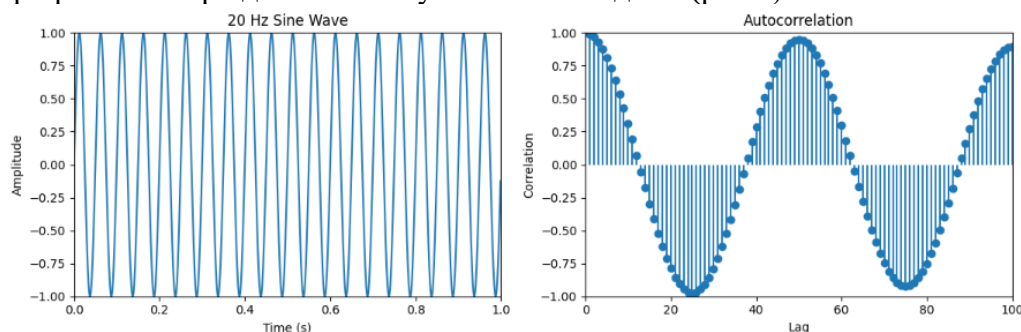


Рис. 5. Приклад автокореляції для синусоїдальної хвилі 20 Гц із частотою 1000 Гц

- Методи просторового аналізу:

Метод MUSIC (Multiple Signal Classification) – один із найточніших методів для визначення напрямку приходу сигналу (DOA – Direction of Arrival), що дозволяє розрізнити кілька одночасно працюючих джерел випромінювання (рис.6).

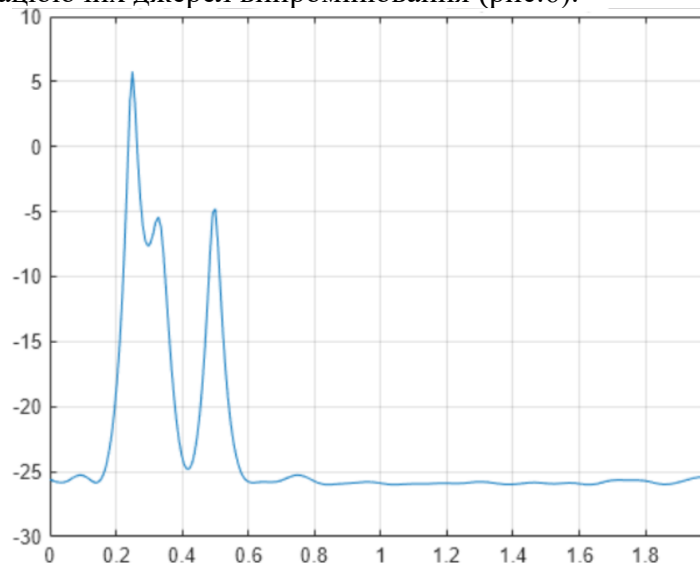


Рис. 6. Приклад визначення складного сигналу за допомогою методу MUSIC (Multiple Signal Classification)

Метод ESPRIT (Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance) – забезпечує швидке та точне визначення параметрів сигналу за рахунок використання математичних властивостей антенних решіток.

Методи адаптивного формування променя (Beamforming) – використовуються в антенних решітках для спрямованої передачі або прийому сигналів, що дозволяє динамічно змінювати характеристики випромінювання залежно від обстановки (рис.7).

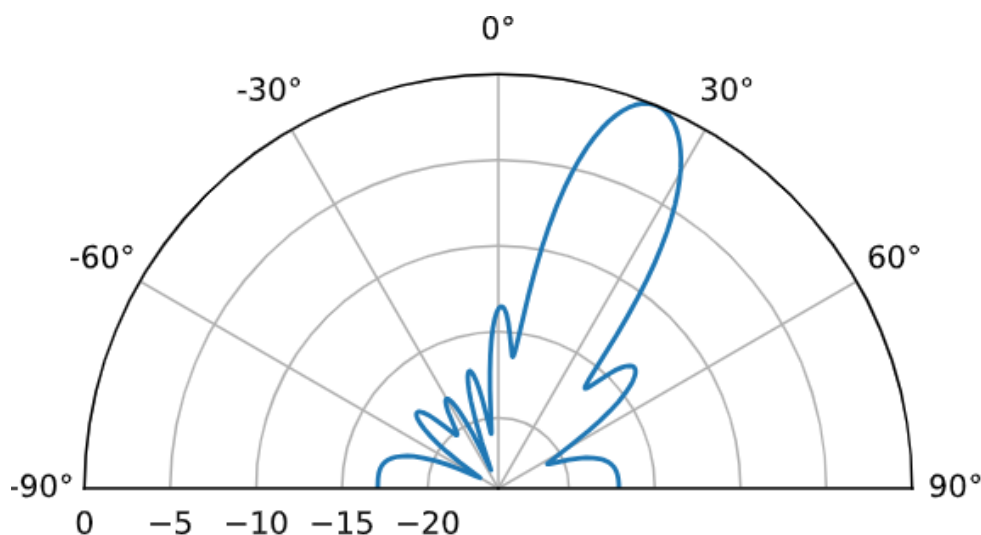


Рис. 7. Приклад отримання сигналу за допомогою методу адаптивного формування променя (Beamforming)

- Комбіновані методи:

Алгоритми штучного інтелекту (ШІ) та машинного навчання – дозволяють аналізувати величезні обсяги даних у реальному часі, класифікувати загрози та передбачати їхню поведінку.

Методи гіперспектрального аналізу – використовують велику кількість вузькосмугових частотних каналів для більш точної диференціації сигналів.

Багатопозиційні системи моніторингу – дозволяють вести спостереження за одним і тим же джерелом сигналу з різних точок, що підвищує точність визначення його місця розташування.

Таким чином, просторово-частотний аналіз є потужним інструментом у боротьбі з загрозами РЕБ. Його використання забезпечує ефективний моніторинг, локалізацію та нейтралізацію джерел перешкод, що значно підвищує рівень інформаційної безпеки та захисту критично важливих систем[1][5][6].

4.3 Алгоритми просторово-частотного аналізу для РЕБ. Ефективність радіоелектронної боротьби значною мірою залежить від можливості швидко ідентифікувати, аналізувати та нейтралізувати джерела радіоперешкод. Використання просторово-частотного аналізу дає змогу підвищити точність та оперативність виявлення ворожих випромінювань, а також визначити їхні параметри для подальшого застосування засобів радіоелектронного придушення або обходу. У цьому розділі розглянуто основні алгоритми просторово-частотного аналізу, їхню ефективність у протидії загрозам РЕБ, а також їхні переваги та обмеження.

Методи просторово-частотного аналізу базуються на використанні математичних і статистичних підходів до обробки сигналів. Вони можуть бути розділені на традиційні методи спектрального оцінювання, адаптивні алгоритми та методи, засновані на штучному інтелекті (ШІ).

Одним із найпоширеніших алгоритмів є метод швидкого перетворення Фур'є (FFT), який використовується для розкладу сигналу у частотну область. Основна його перевага – швидкість обробки великих обсягів даних, що дозволяє оперативно визначати частотний спектр вхідних сигналів. Однак цей метод має обмежену роздільну здатність, що ускладнює точне визначення параметрів сигналу при високій щільності джерел випромінювання[8].

Більш точним методом є метод власних значень MUSIC (Multiple Signal Classification), який використовується для оцінки напрямку приходу сигналу (DOA – Direction of Arrival). Він базується на розкладі вхідного сигналу на власні вектори та дозволяє розрізняти кілька джерел випромінювання навіть при їх близькому розташуванні у просторі. Основна перевага MUSIC – висока точність визначення кутів приходу сигналів, що критично важливо для систем захисту від РЕБ. Недоліком є значна обчислювальна складність, що може знижувати його ефективність у реальному часі.

Іншим алгоритмом, що широко використовується в РЕБ, є метод ESPRIT (Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance). Він схожий на MUSIC, але має менші вимоги до обчислювальних ресурсів, оскільки використовує інваріантність ротаційної структури антенних решіток. ESPRIT забезпечує високу точність при меншій складності, однак його ефективність залежить від характеристик антенної решітки.

Методи адаптивного формування діаграми спрямованості (Beamforming) дозволяють змінювати характеристики приймання сигналів залежно від розташування джерел завад. Адаптивні антенні решітки, що використовують алгоритми LMS (Least Mean Squares) або RLS (Recursive Least Squares), здатні ефективно пригнічувати небажані сигнали та підсилювати корисні. Основний недолік цих методів – необхідність значних обчислювальних ресурсів, особливо при швидких змінах радіоелектронної обстановки[2].

Останнім часом значного поширення набули алгоритми машинного навчання та глибокого навчання. Вони дозволяють аналізувати радіоелектронне середовище, класифікувати загрози та адаптивно налаштовувати системи захисту. Наприклад, нейронні мережі, натреновані на великій кількості варіантів атак РЕБ, можуть передбачати найбільш ефективні методи протидії. Основним викликом для впровадження цих методів є необхідність великих обсягів навчальних даних і складність реалізації в умовах реального часу.

Порівняння алгоритмів з точки зору ефективності для протидії РЕБ. Для оцінки ефективності алгоритмів просторово-частотного аналізу важливо враховувати такі показники, як точність визначення джерел завад, швидкість обробки сигналів, адаптивність до змінних умов та стійкість до складних сценаріїв атак.

Таблиця 1.

Порівняння основних алгоритмів просторово-частотного аналізу для РЕБ

Алгоритм	Точність напрямку сигналу	Швидкість обробки	Адаптивність до змінних умов	Обчислювальна складність	Переваги	Обмеження
FFT	Низька	Висока	Низька	Низька	Швидка спектральна обробка	Обмежена роздільна здатність
MUSIC	Висока	Середня	Висока	Висока	Висока точність DOA	Висока ресурсомісткість
ESPRIT	Висока	Середня	Середня	Середня	Менше ресурсозатратний, ніж MUSIC	Залежність від антенних решіток
Beamforming	Висока	Середня	Висока	Висока	Придушення завад у реальному часі	Високі вимоги до обчислень
ML/DL	Висока	Середня	Висока	Висока	Самонавчання, адаптація до нових загроз	Потребує великих обсягів даних

Оцінка показників алгоритмів у таблиці ґрунтується на їхніх характеристиках, ефективності та практичному використанні в задачах просторово-частотного аналізу для протидії загрозам радіоелектронної боротьби (РЕБ).

Точність визначення напрямку сигналу в алгоритмі FFT оцінюється як низька, оскільки він лише розкладає сигнал на частотні складові, не дозволяючи точно визначити напрямок його приходу (DOA). Методи MUSIC та ESPRIT забезпечують високу точність, оскільки вони базуються на обчисленні власних векторів коваріаційної матриці, що дає можливість виділяти сигнали навіть у складних умовах. Алгоритм адаптивного beamforming також має високу точність через можливість формування вузької діаграми спрямованості, що зменшує вплив завад. Методи машинного навчання (ML/DL) демонструють високу точність завдяки здатності аналізувати складні закономірності в сигналі та ідентифікувати навіть слабкі випромінювання.

Швидкість обробки в FFT оцінюється як висока, оскільки алгоритм має низьку обчислювальну складність, що забезпечує швидкий аналіз сигналів. MUSIC і ESPRIT мають середню швидкість через необхідність обчислення власних значень і векторів, що займає значні ресурси, особливо при збільшенні кількості елементів антенної решітки. Адаптивний beamforming також має середню швидкість, оскільки вимагає постійного оновлення вагових коефіцієнтів, що потребує значних обчислювальних ресурсів. Методи ML/DL мають низьку або середню швидкість: навчання моделі займає багато часу, але після тренування обробка сигналів може бути значно прискорена за рахунок оптимізації на високопродуктивних платформах.

Адаптивність до змінних умов у FFT є низькою, оскільки цей алгоритм не враховує зміну характеристик сигналу в часі або просторі. MUSIC, ESPRIT та адаптивний beamforming мають високу адаптивність, оскільки вони можуть працювати в різних умовах, налаштовуючи свої параметри під поточні характеристики сигналу та середовища. Методи ML/DL демонструють високу адаптивність, оскільки вони можуть самостійно навчатися, аналізуючи нові дані та адаптуючись до змінних умов сигналу.

Обчислювальна складність FFT є низькою, що робить його привабливим для задач швидкої спектральної обробки, однак його можливості у виявленні джерел сигналів обмежені. MUSIC має високу обчислювальну складність через необхідність проведення спектрального пошуку, тоді як ESPRIT має середню складність, оскільки він використовує спеціальні матричні перетворення, що знижують обчислювальне навантаження. Адаптивний beamforming має високу складність через постійне оновлення параметрів, а ML/DL характеризуються високою обчислювальною складністю, оскільки тренування глибоких нейронних мереж та їх подальша оптимізація вимагають значних обчислювальних потужностей.

Вибір конкретного алгоритму залежить від умов бойової обстановки та технічних можливостей системи РЕБ. У більшості випадків доцільним є комбіноване використання кількох методів, наприклад, попередня обробка сигналів методом FFT з подальшим застосуванням MUSIC або ESPRIT для точного визначення координат загроз.

4.4 Перспективи розвитку алгоритмів просторово-частотного аналізу. Сучасний розвиток радіоелектронної боротьби (РЕБ) вимагає постійного вдосконалення методів просторово-частотного аналізу. Зростання складності загроз, адаптивність завад та розвиток засобів електронного ураження потребують інноваційних підходів до обробки сигналів. Новітні дослідження в цій галузі зосереджуються на підвищенні точності визначення джерел випромінювання, зменшенні обчислювальної складності алгоритмів та впровадженні штучного інтелекту для автоматизованого аналізу загроз.

Ряд сучасних наукових розробок спрямовані на вдосконалення традиційних алгоритмів просторово-частотного аналізу та інтеграцію нових методів машинного навчання. Основні напрями досліджень включають:

- Підвищення роздільної здатності алгоритмів MUSIC та ESPRIT шляхом модифікації математичних моделей і покращення параметрів антенних решіток.
- Використання гібридних методів, що поєднують FFT та методи високої роздільної здатності, що дозволяє забезпечити баланс між швидкістю та точністю аналізу.
- Адаптація методів машинного навчання (ML) та глибокого навчання (DL) для класифікації та прогнозування параметрів сигналів.
- Розробка квантових алгоритмів для швидкої обробки сигналів, що може забезпечити значне зростання продуктивності в майбутньому.

Результати цих досліджень підтверджують можливість значного покращення ефективності існуючих алгоритмів просторово-частотного аналізу. Нижче наведена таблиця основних напрямів досліджень та їх перспективних результатів.

Інноваційні підходи та технології для покращення алгоритмів

Одним із найбільш перспективних напрямів є використання адаптивних алгоритмів машинного навчання для автоматизації аналізу спектра та визначення джерел загроз. Основні інновації в цій сфері включають:

1. Нейронні мережі для обробки сигналів. Глибокі нейронні мережі (DNN) використовуються для класифікації сигналів, виявлення перешкод та прогнозування їх характеристик. Їхня перевага полягає у здатності адаптуватися до змінних умов і обробляти складні нелінійні сигнали.

2. Адаптивні алгоритми обробки даних. Використання самоналаштовуваних методів, що можуть змінювати свої параметри залежно від обстановки, підвищує стійкість до динамічних загроз. Це особливо важливо для боротьби з адаптивними завадами.
3. Розробка когнітивних радіосистем. Когнітивні системи, засновані на технологіях штучного інтелекту, можуть автоматично виявляти загрози, оцінювати їх рівень небезпеки та пропонувати найкращі стратегії протидії.
4. Оптимізація алгоритмів для використання на FPGA та GPU. Оскільки обчислювальні витрати є одним із ключових обмежень, сучасні дослідження фокусуються на реалізації алгоритмів на спеціалізованих апаратних платформах, таких як графічні процесори (GPU) та програмовані логічні матриці (FPGA).
5. Використання квантових обчислень. У майбутньому квантові обчислення можуть суттєво змінити підходи до просторово-частотного аналізу, забезпечивши експоненційне зростання швидкості обробки даних.

Перспективи розвитку алгоритмів просторово-частотного аналізу безпосередньо пов'язані з удосконаленням обчислювальних методів, розвитком штучного інтелекту та впровадженням квантових технологій. Використання адаптивних алгоритмів, когнітивних радіосистем та машинного навчання дозволить значно підвищити ефективність протидії загрозам РЕБ. Подальші дослідження мають бути зосереджені на оптимізації існуючих методів та розробці нових підходів, що забезпечать високу точність аналізу, швидкість обробки та адаптивність до змінних умов бойового середовища[9][10].

Висновки

У цій статті було проведено дослідження алгоритмів просторово-частотного аналізу, спрямованих на протидію загрозам радіоелектронної боротьби (РЕБ). Розглянуто фундаментальні принципи РЕБ, її загрози та методи впливу, а також основні підходи до забезпечення стійкості радіоелектронних систем до деструктивних впливів. Зокрема, проведено аналіз найбільш поширених алгоритмів просторово-частотного аналізу, що застосовуються для виявлення, класифікації та нейтралізації джерел загроз у складних умовах електромагнітного протистояння.

Аналіз існуючих методів показав, що традиційні алгоритми, такі як Швидке перетворення Фур'є (FFT), Метод власних векторів MUSIC, ESPRIT та адаптивний beamforming, широко застосовуються у військових і цивільних системах для оцінки параметрів сигналів. Кожен з цих методів має свої переваги та обмеження з точки зору точності визначення напрямку приходу сигналів, швидкості обробки та здатності адаптуватися до змінних умов радіоелектронного середовища.

- FFT забезпечує високу швидкість обробки, але має обмежену роздільну здатність і не дозволяє ефективно розрізняти близько розташовані сигнали.
- MUSIC та ESPRIT демонструють високу точність в оцінці параметрів сигналів, але вимагають значних обчислювальних ресурсів і є вразливими до помилок моделювання шумів та перешкод.
- Адаптивний beamforming дозволяє формувати вузькі діаграми спрямованості для ізоляції корисного сигналу від завад, однак є складним у реалізації та вимагає динамічного коригування вагових коефіцієнтів.

Оцінка сучасних підходів продемонструвала, що для забезпечення високої ефективності протидії загрозам РЕБ необхідно використовувати комбіновані методи, які інтегрують адаптивні алгоритми аналізу спектра, методи машинного навчання та когнітивні

технології. Це дозволяє не лише покращити точність і швидкість обробки сигналів, але й адаптувати системи в режимі реального часу до змін у радіоелектронному середовищі.

Перспективні напрямки розвитку алгоритмів просторово-частотного аналізу включають:

1. Інтеграцію методів машинного навчання та штучного інтелекту для автоматизованого аналізу радіосигналів. Це дає змогу ефективно класифікувати типи загроз, прогнозувати динаміку їх змін і швидко адаптувати контрзаходи.
2. Оптимізацію алгоритмів для роботи на високопродуктивних обчислювальних платформах (GPU, FPGA), що дозволяє знизити затримки в обробці та підвищити продуктивність аналізу спектра у багатоканальних системах.
3. Розробку квантових обчислювальних методів для прискореного аналізу великих обсягів даних. Використання квантових алгоритмів може значно підвищити ефективність обробки сигналів у складних радіоелектронних середовищах.
4. Використання гібридних підходів, які поєднують традиційні методи аналізу спектра (FFT, MUSIC, ESPRIT) з адаптивними алгоритмами глибокого навчання, що забезпечує підвищену точність розпізнавання загроз і адаптацію до нових видів РЕБ-впливу.
5. Розвиток когнітивних радіосистем, які здатні самостійно оцінювати загрози та в режимі реального часу змінювати параметри аналізу та протидії.

Таким чином, подальший розвиток алгоритмів просторово-частотного аналізу є стратегічно важливим напрямком у сфері електронної безпеки та військових технологій. Впровадження інноваційних технологій дозволить значно підвищити стійкість, надійність та ефективність систем електронного захисту. Це забезпечить високий рівень ситуаційної обізнаності та дозволить своєчасно реагувати на нові загрози у динамічному радіоелектронному середовищі, що є критично важливим у сучасних умовах гібридного протистояння та інформаційної війни.

Перелік посилань

1. Застосування частотного переналаштування для захисту безпілотних літальних апаратів / Р. Кутень // ResearchGate. – 2023. – DOI:10.33445/sds.2024.14.2.7
2. Дослідження сучасних методів РЕБ та методів і засобів протидії радіоелектронним загрозам // Журнал "Інформаційна безпека". – 2022. – DOI:10.18372/2225-5036.29.17873
3. Перспективи розвитку технології виявлення та розпізнавання об'єктів із нелінійними електричними властивостями в маскувальних середовищах // ChipNews. – 2024. – ChipNews.
4. Удосконалення системи охорони військових об'єктів шляхом розробки засобів радіоелектронної боротьби для протидії БПЛА / В. Іванченко, П. Сидоренко // ResearchGate. – 2023. – DOI:10.30748/zhups.2021.69.05
5. Завадозахист радіоелектронних засобів. Частина 1 / Під ред. О. Г. Ткаченка // НТУУ "КПІ". – 2021. – <https://ela.kpi.ua/items/3b85b390-0cf8-444a-8875-04fcd8c0bb21>
6. Застосування та перспективи розвитку мобільних засобів радіоелектронної розвідки тактичної ланки сил сектору безпеки та оборони України / І. Власов, А. Мельник // Наукові праці НЮУ ім. Ярослава Мудрого. – 2023. – <https://dspace.nlu.edu.ua/jspui/handle/123456789/20200>
7. Теоретичні основи розробки та експлуатації систем озброєння // Index Copernicus. – 2019. – DOI: 10.30748/soivt.2019.57.07
8. Бойове застосування радіотехнічних інформаційних систем і комплексів // Національний університет цивільного захисту України. – <https://www.hups.mil.gov.ua/assets/doc/science/conference/15/13.pdf>
9. Тенденції та перспективи розвитку малогабаритних радіолокаційних станцій / В. Петров, С. Орлов // ResearchGate. – 2024. – DOI:10.30748/zhups.2024.79.07
10. "Foundations of Electromagnetic Compatibility: with Practical Applications (pp.439-452)" by Bogdan Adamczyk (2017). <https://doi.org/10.1002/9781119120810.ch15>

Надійшла 18.01.2025