



DOI 10.28925/2663-4023.2026.32.1186

УДК: 004.7;004.4

Бибик Роман Тарасович

асистент кафедри захисту інформації

Національний Університет «Львівська Політехніка», Львів, Україна

ORCID: 0000-0002-9506-014X

roman.t.bybyk@lpnu.ua

Стефанків Артем Вікторович

асистент кафедри захисту інформації

Національний Університет «Львівська Політехніка», Львів, Україна

ORCID: 0009-0006-8851-8358

artem.stefankiv.mkbas.2024@lpnu.ua

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОСТОРОВО-ЧАСТОТНИХ МЕТОДІВ ФІЛЬТРАЦІЇ ТА ПРИГНІЧЕННЯ ЗАВАД У СИСТЕМАХ ПРОТИДІЇ РЕБ

Анотація. У статті здійснено теоретичний аналіз просторово-частотних методів фільтрації та пригнічення завад у системах протидії радіоелектронній боротьбі. Розглянуто основні типи радіоелектронних завад та їх вплив на функціонування сучасних радіоелектронних систем зв'язку, радіолокації та навігації. Проаналізовано принципи просторової та частотної селекції сигналів, а також особливості їх комбінованого застосування з метою підвищення завадостійкості. Особливу увагу приділено адаптивним просторово-частотним алгоритмам, які забезпечують ефективне пригнічення як вузькосмугових, так і широкосмугових завад в умовах інтенсивного радіоелектронного впливу. Проведено порівняльний аналіз просторово-частотних методів з окремими просторовими та частотними підходами, визначено їх переваги, обмеження та теоретичні межі ефективності. Окреслено перспективні напрями розвитку просторово-частотної обробки сигналів у контексті когнітивних радіосистем та інтеграції з методами штучного інтелекту. Отримані результати можуть бути використані для подальших теоретичних досліджень і вдосконалення систем протидії радіоелектронній боротьбі.

Ключові слова: радіоелектронна боротьба, завадостійкість, фільтрація завад, просторові методи, частотні методи, просторово-частотна обробка, адаптивні алгоритми.

ВСТУП

Стрімкий розвиток радіоелектронних технологій і їхнє широке застосування у військових та цивільних системах роблять радіоелектронну боротьбу (РЕБ) одним із ключових факторів, що впливають на ефективність сучасних радіоелектронних систем. Сучасні конфлікти характеризуються високою щільністю радіовипромінювань, динамічною зміною радіообстановки та активним використанням засобів постановки завад, що ускладнює підтримку надійного зв'язку, навігації та радіолокаційного спостереження. У такому середовищі підвищення завадостійкості систем набуває стратегічного значення та вимагає ефективних методів фільтрації й пригнічення завад. Радіоелектронні завади, як навмисні, так і випадкові, призводять до погіршення якості прийому сигналів, зниження відношення сигнал/шум, спотворення інформаційних параметрів і збільшення ймовірності помилок при виявленні, супроводі та декодуванні сигналів. Традиційні методи захисту, що базуються лише на часовій чи частотній селекції, у сучасних умовах часто виявляються недостатньо ефективними, тому зростає потреба у більш комплексних підходах до протидії завадам.



Одним із перспективних напрямів є застосування просторових методів фільтрації. Вони ґрунтуються на використанні антенних решіток і принципах просторової селекції сигналів за напрямом приходу. Формування адаптивних діаграм спрямованості дозволяє виділяти корисні сигнали та створювати просторові “нулі” в напрямках джерел завад. Водночас ефективність цих методів залежить від конфігурації антенної системи, кількості її елементів та точності оцінки параметрів завадової обстановки. Поряд із просторовими методами широке застосування мають частотні підходи, які дозволяють виділяти сигнали за спектральними характеристиками. Частотна обробка ефективно пригнічує вузькосмугові та широкосмугові завади за допомогою смугових, адаптивних і цифрових фільтрів, а також методів перебудови робочих частот. Проте при наявності широкосмугових або спектрально перекривних завад ці методи мають обмежені можливості і потребують додаткових способів обробки сигналів. Поєднання просторових і частотних методів у рамках просторово-частотної обробки сигналів дає змогу значно підвищити ефективність пригнічення завад у системах протидії РЕБ. Такий підхід одночасно використовує інформацію про напрям приходу сигналу та його спектральні характеристики, що дозволяє гнучко реагувати на зміни радіоелектронної обстановки. Це особливо важливо у випадку застосування інтелектуальних і маневрених засобів РЕБ, здатних швидко змінювати параметри завад.

Постановка проблеми. У сучасних умовах розвитку радіоелектронних систем та засобів радіоелектронної боротьби (РЕБ) спостерігається стійка тенденція до ускладнення завадового середовища. Радіоелектронні засоби все частіше функціонують в умовах одночасного впливу кількох типів завад, які відрізняються за спектральними, просторовими та часовими характеристиками, а також мають здатність до адаптації у відповідь на застосовувані заходи захисту. За таких умов традиційні одновимірні підходи до фільтрації та пригнічення завад, орієнтовані лише на часову або частотну селекцію, поступово втрачають свою ефективність.

Просторові методи, зокрема методи формування діаграми спрямованості на основі антенних решіток, дозволяють частково вирішити проблему за рахунок використання кутової відмінності між корисними сигналами та джерелами завад. Однак у реальних сценаріях РЕБ така відмінність не завжди є достатньо вираженою, особливо у випадках багатоджерельних, маневрених або широкосмугових завад. Крім того, ефективність просторових методів істотно знижується за наявності корельованих сигналів або при обмеженій кількості антенно-приймальних каналів. З іншого боку, частотні методи фільтрації забезпечують ефективне пригнічення завад із локалізованими спектральними характеристиками, проте в умовах широкосмугових або частотно-перебудовних завад їх застосування супроводжується або значними втратами корисного сигналу, або необхідністю ускладнення алгоритмів обробки. Це створює суттєві обмеження для їх використання в системах, що повинні забезпечувати високу завадостійкість у реальному масштабі часу.

У зв'язку з цим актуалізується проблема пошуку та теоретичного обґрунтування комплексних підходів до пригнічення завад, здатних одночасно враховувати просторові та частотні властивості сигналів і завад. Просторово-частотні методи обробки сигналів розглядаються як один із найбільш перспективних напрямів у цьому контексті, оскільки вони дозволяють поєднати переваги просторової селекції з можливостями спектрального аналізу. Водночас питання меж ефективності таких методів, умов їх оптимального застосування та порівняння з традиційними підходами залишаються недостатньо систематизованими в наукових публікаціях, особливо в рамках оглядово-аналітичних досліджень без практичної складової. Таким чином, існує наукова



проблема, що полягає у необхідності комплексного аналізу просторово-частотних методів фільтрації та пригнічення радіоелектронних завад, визначення їх теоретичних переваг, обмежень та потенціалу застосування в сучасних і перспективних системах протидії РЕБ.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Радіоелектронна боротьба та методи підвищення завадостійкості радіоелектронних систем залишаються предметом активного наукового інтересу протягом останніх десятиліть. Аналіз останніх наукових публікацій свідчить про значне розширення теоретичних й прикладних досліджень у напрямі адаптивної обробки сигналів, включно з просторовими, частотними та просторово-частотними методами. Одним із основних напрямів є вивчення адаптивних алгоритмів просторової селекції та формування діаграми спрямованості на основі антенних решіток. У широкому спектрі робіт було показано, що адаптивне формування променя (beamforming) здатне значно знижувати рівень завад від певних напрямів, що позитивно впливає на відношення сигнал/завада в приймачі. Проте багато публікацій також підкреслюють, що в реальних умовах поширення сигналів із багатопроменевими компонентами або при відсутності чіткої кутової різниці між корисним сигналом і завадою ефективність чисто просторових методів може знижуватися. Такі спостереження спонукають дослідників до пошуку більш гнучких способів обробки.

У контексті частотних методів фільтрації завад останніми роками значну увагу приділено розробці адаптивних та цифрових фільтрів, призначених для придушення як вузькосмугових, так і широкосмугових завад. Частотні підходи продовжують залишатися основою багатьох практичних рішень завдяки технічній простоті реалізації та високій точності при спектрально відокремлених перешкодах. Однак численні дослідження вказують на обмеження цих методів у ситуаціях, коли спектри корисного сигналу та завад перекриваються або коли сама структура перешкод є широкосмуговою, що зумовлює потребу в більш комплексних підходах. Комплексні, просторово-частотні методи, які об'єднують просторові та частотні ознаки сигналів і перешкод, останнім часом привертають дедалі більшу увагу дослідників. У наукових публікаціях останніх років запропоновано цілу низку алгоритмів, що поєднують адаптивне формування діаграм спрямованості з частотною селекцією на основі різних перетворень (наприклад, фрактальне перетворення, часово-частотне розгортання, просторово-частотний STAP – Space-Time Adaptive Processing). У цих роботах детально аналізуються теоретичні характеристики таких алгоритмів, їх здатність адаптуватися до складних завадових сценаріїв і забезпечувати підвищений рівень придушення завад порівняно з традиційними підходами.

Водночас у багатьох публікаціях вказується на наявні прогалини в існуючих дослідженнях. Зокрема, не завжди достатньо розглядаються умови стабільності та стійкості адаптивних алгоритмів у реальних умовах, коли просторові та спектральні характеристики корисного сигналу й завад можуть динамічно змінюватися. Також відсутні єдині узгоджені критерії для порівняння ефективності різних методів, що ускладнює їх об'єктивну оцінку в рамках єдиного теоретичного підходу. Крім того, більшість сучасних публікацій зосереджуються на окремих алгоритмах або випадках, тоді як питання загальної теоретичної оцінки та порівняльного аналізу комплексних методів у літературі представлено менш повно. Отже, аналіз останніх досліджень підтверджує, що просторово-частотні методи є одним із перспективних напрямів у сфері протидії РЕБ, що поєднує переваги адаптивної обробки сигналів у різних доменах. Водночас залишається необхідність у подальшому узагальненні існуючих



підходів, формуванні єдиних критеріїв оцінювання та більш глибокому теоретичному дослідженні умов їх ефективного застосування.

Мета цієї статті – дослідити просторово-частотні методи фільтрації та пригнічення завад у системах протидії РЕБ, проаналізувати їхні принципи роботи, переваги й обмеження та окреслити перспективні напрямки розвитку. Об'єкт дослідження – процеси обробки сигналів у радіоелектронних системах в умовах завад, а предмет – просторово-частотні методи фільтрації та пригнічення завад. Результати мають теоретичне значення і можуть слугувати науково-методичною основою для подальших досліджень у галузі протидії радіоелектронній боротьбі.

Завдання дослідження:

1. Проаналізувати сучасні підходи до просторової, частотної та просторово-частотної обробки сигналів, що застосовуються в системах протидії радіоелектронній боротьбі, з урахуванням їхніх теоретичних засад і принципів функціонування.

2. Систематизувати основні методи фільтрації та пригнічення завад за просторовими та спектральними ознаками, визначивши їхні переваги, обмеження та умови ефективного застосування.

3. Порівняти ефективність просторових, частотних і просторово-частотних методів з позицій теоретичних критеріїв завадостійкості та адаптивності в складних завадових умовах.

Визначити основні напрями подальших теоретичних досліджень у сфері просторово-частотної обробки сигналів для підвищення завадостійкості сучасних радіоелектронних систем.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Загальні засади радіоелектронних завад і методів їх пригнічення. Радіоелектронні завади є однією з головних причин, що обмежують ефективність сучасних радіоелектронних систем. Щоб зрозуміти їхній вплив і обрати адекватні методи пригнічення, доцільно класифікувати завади за кількома ключовими ознаками. За частотними характеристиками виділяють вузькосмугові та широкосмугові завади. Вузькосмугові займають невелику ділянку спектра і часто накладаються прямо на робочу частоту корисного сигналу, що ускладнює його виділення звичайними фільтрами. Широкосмугові ж охоплюють значну частину спектра або весь робочий діапазон системи, створюючи підвищений рівень шуму і знижуючи відношення сигнал/шум. За просторовими характеристиками завади класифікують залежно від напрямку їхнього приходу до приймальної антени. Існують завади з фіксованих напрямів, багатонапрямні завади та завади з динамічно змінюваними просторовими параметрами. Ці властивості важливі для застосування методів просторової селекції та формування адаптивних діаграм спрямованості. За часовими характеристиками розрізняють безперервні, імпульсні та квазіперіодичні завади. Безперервні створюють постійний вплив на систему, імпульсні – короткочасні, але інтенсивні, що може призводити до втрати синхронізації або спотворення інформації. Квазіперіодичні поєднують властивості обох типів і важко прогнозуються.

Ще одна важлива класифікація – за типом впливу: активні та пасивні завади. Активні завади формуються спеціальними передавачами і мають цілеспрямований характер, вони можуть маскувати корисний сигнал або імітувати його спектральні та часові властивості. Пасивні завади пов'язані з відбиттям, розсіюванням або повторним випромінюванням електромагнітної енергії в навколишньому середовищі. Вони



викликають ефекти накладання сигналів, хибні цілі у радіолокації та спотворення у системах зв'язку. Сумарний вплив активних і пасивних завад знижує чутливість приймача, точність оцінки параметрів сигналу та стійкість системи до перешкод. У сучасному РЕБ завади часто застосовуються комплексно, що вимагає багаторівневих методів захисту. Методи боротьби з завадами можна умовно поділити на часові, частотні, просторові та комбіновані. Часові методи використовують різницю в часі між корисним сигналом і завадою, наприклад, віконну обробку або усереднення сигналів, і добре працюють проти імпульсних завад. Частотні методи виділяють сигнали за спектральними ознаками, застосовуючи смугові, режекторні чи адаптивні фільтри, проте при перекритті спектрів ефективність падає.

Просторові методи ґрунтуються на напрямку приходу сигналів і реалізуються через антенні решітки. Формування просторових «нулів» у напрямках завад знижує їхній вплив без суттєвого спотворення корисного сигналу, але потребує складних алгоритмів адаптації і точного оцінювання просторових параметрів. Особливе місце займають просторово-частотні методи, які поєднують переваги просторової та частотної обробки. Вони одночасно враховують напрям приходу сигналу та його спектр, що підвищує гнучкість і ефективність пригнічення завад. На відміну від однофакторних методів, просторово-частотна обробка забезпечує стабільну роботу систем у складній, динамічній завадовій обстановці. Вона особливо ефективна проти адаптивних і багатокомпонентних завад, характерних для сучасних засобів РЕБ, хоча й потребує значних обчислювальних ресурсів та складних алгоритмів. Таким чином, просторово-частотні методи можна вважати логічним етапом еволюції систем захисту від завад, здатним забезпечити високий рівень завадостійкості в умовах сучасного радіоелектронного протиборства.

Таблиця 1

Класифікація методів пригнічення радіоелектронних завад

Клас методів	Основний принцип	Область застосування	Основні обмеження
Часові	Віконна обробка, часові фільтри	Імпульсні завади	Низька ефективність при широкосмугових завадах
Частотні	Смугове фільтрування, notch-фільтри	Вузькосмугові завади	Втрата корисного сигналу
Просторові	Адаптивне формування діаграми спрямованості	Напрямні завади	Обмежена ефективність при багатоджерельних завадах
Просторово-частотні	Спільна обробка простору і спектра	Складні РЕБ-сценарії	Висока обчислювальна складність

Наведена класифікація методів пригнічення радіоелектронних завад відображає базові підходи до підвищення завадостійкості радіоелектронних систем залежно від домінуючих характеристик завадового впливу. Поділ на часові, частотні, просторові та просторово-частотні методи дозволяє систематизувати існуючі засоби протидії РЕБ з позицій фізичної природи завад та механізмів їх селекції. Особливу увагу привертають просторово-частотні методи, які поєднують переваги декількох доменів обробки сигналів. Хоча вони характеризуються підвищеною обчислювальною складністю, саме ці методи забезпечують найбільшу універсальність і адаптивність в умовах складних, багатфакторних радіоелектронних загроз.

Просторові методи фільтрації та пригнічення завад. Просторові методи фільтрації та пригнічення завад ґрунтуються на використанні різниці в напрямках приходу корисних сигналів і завад до приймальної системи. Ідея просторової селекції полягає в

тому, щоб розділяти сигнали не за часом чи частотою, а за їх просторовими характеристиками, які визначаються геометрією поширення електромагнітних хвиль. Такий підхід особливо ефективний, коли завади мають виражену напрямну структуру або надходять з обмеженої кількості джерел. Ключовим елементом реалізації просторових методів є антенні решітки – системи з множини просторово рознесених антенних елементів. Вони дозволяють приймати один і той самий сигнал з різними фазовими зсувами та амплітудами залежно від напрямку приходу хвилі. Аналіз цих просторових відмінностей дає змогу оцінювати кутові параметри сигналів і завад, а також формувати необхідну просторову вибірковість. У системах протидії РЕБ антенні решітки дозволяють створювати спрямовані діаграми приймання: посилювати сигнал від бажаного джерела і одночасно послаблювати сигнали від напрямків завад. Просторова селекція особливо важлива проти активних завад, коли противник використовує потужні передавачі з фіксованих або повільно змінюваних напрямів. Навіть якщо спектр або часові характеристики завади дуже схожі на корисний сигнал, просторові відмінності дозволяють ефективно відокремлювати сигнал від перешкоди. Важливою перевагою просторових методів є їхня відносна незалежність від типу модуляції та спектральної структури сигналів. На відміну від чисто частотних методів, просторові підходи залишаються ефективними навіть за повного спектрального перекриття сигналу і завади, що робить їх універсальним інструментом підвищення завадостійкості у системах зв'язку, радіолокації та радіонавігації. Разом із тим ефективність просторової селекції безпосередньо залежить від кількості антенних елементів, їх взаємного розташування, стабільності фазових характеристик і точності оцінки просторових параметрів сигналів.

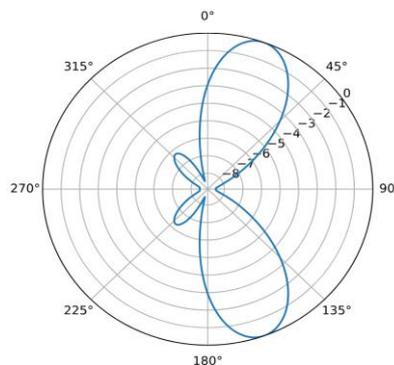


Рис. 1. Полярна діаграма спрямованості із використанням просторової обробки (DOA/beamforming): спектр відповідних напрямів до/після обробки.

Формування діаграми спрямованості – центральний механізм просторової обробки. Керуючи амплітудно-фазовими коефіцієнтами антен, можна підсилювати прийом сигналів з бажаного напрямку і водночас ослаблювати сигнали з небажаних напрямів. Особливо важливе формування просторових «нулів» – напрямів, у яких сигнал мінімізується, що ефективно пригнічує завади від конкретних джерел. Сучасні системи протидії РЕБ широко використовують адаптивні просторові методи, що автоматично перебудовують діаграму спрямованості відповідно до поточної завадової обстановки. Вони дозволяють відстежувати рух джерел завад, змінювати напрямки приймання і адаптуватися до динаміки електромагнітного середовища. Адаптивність є критичною, особливо при застосуванні інтелектуальних та маневрених засобів РЕБ.

Адаптивні алгоритми зазвичай спрямовані на мінімізацію потужності завад на виході приймача або на максимізацію відношення сигнал/завада. Вони можуть одночасно пригнічувати кілька джерел завад за умови достатньої кількості ступенів свободи, які визначаються числом антенних елементів. Проте зі збільшенням кількості джерел або їхньою корельованістю ефективність алгоритмів може знижуватися. Незважаючи на значні переваги, просторові методи мають низку обмежень. Їх ефективність падає, якщо напрям приходу завади близький або збігається з напрямом корисного сигналу. Багатопроневе поширення може створювати додаткові кутові компоненти, що ускладнює формування стабільних просторових нулів. Адаптивні алгоритми чутливі до похибок оцінки параметрів сигналу і можуть втрачати ефективність у швидкозмінних умовах. Крім того, реалізація просторових методів вимагає значних обчислювальних ресурсів та складної апаратної бази, що обмежує їх застосування в компактних або енергетично обмежених системах.

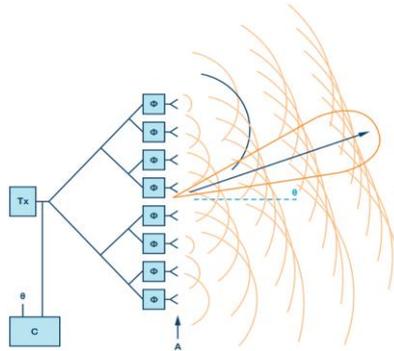


Рис. 2. Схема антенної решітки та принцип формування діаграми спрямованості

Це обумовлює необхідність комбінувати просторові методи з частотними та часовими підходами, створюючи основу для просторово-частотних методів пригнічення завад. Таким чином, просторові методи фільтрації та пригнічення завад є потужним інструментом підвищення завадостійкості радіоелектронних систем, але їхня максимальна ефективність досягається лише у складі комплексної багатовимірної обробки сигналів.

Частотні методи фільтрації завад. Частотні методи фільтрації завад базуються на спектральних відмінностях між корисними сигналами та завадовими випромінюваннями. Основна ідея частотної селекції полягає у виділенні сигналів у заданому робочому діапазоні частот та ослабленні компонентів спектра, які не несуть корисної інформації або мають завадовий характер. Цей підхід є одним із найпоширеніших у радіоелектронних системах завдяки простоті реалізації та універсальності. У системах протидії РЕБ частотна селекція реалізується за допомогою смугових, режекторних та адаптивних фільтрів, які можуть працювати як в аналоговому, так і цифровому виконанні. Смугові фільтри обмежують спектр прийнятого сигналу заданою смугою пропускання, зменшуючи вплив позасмугових завад. Режекторні фільтри, навпаки, вибірково пригнічують окремі спектральні компоненти, що характерні для вузькосмугових завад. Адаптивні частотні фільтри динамічно змінюють свої параметри відповідно до поточної спектральної обстановки. Вони відстежують зміни характеристик завад і оптимізують процес фільтрації, що особливо важливо при використанні противником маневрених або когнітивних засобів РЕБ. Цифрова реалізація значно розширює можливості фільтрів завдяки високій



точності обробки та інтеграції з іншими видами сигналперетворень. Особливу увагу приділяють придушенню вузькосмугових і широкосмугових завад. Вузькосмугові завади зазвичай мають виражену спектральну структуру, що полегшує їхнє виявлення та фільтрацію. Широкасмугові завади охоплюють значну частину спектра та вимагають складніших методів обробки, включаючи адаптивне регулювання смуги пропускання та використання багатосмугових фільтрів.

Окремий напрям – частотна перебудова робочих діапазонів. Частотна маневреність дозволяє системі змінювати робочу частоту або набір частот у відповідь на виявлені завади, ускладнюючи противнику ефективне наведення завад. Цей підхід широко використовується у системах зв'язку та навігації для підвищення стійкості до цілеспрямованих перешкод. Частотна агрегація передбачає одночасне використання декількох рознесених частотних каналів, що дозволяє розподіляти інформаційний потік і зменшувати ймовірність його повного блокування завадою. У контексті РЕБ така агрегація підвищує живучість системи, оскільки для ефективного придушення потрібно впливати одночасно на кілька діапазонів. Разом із тим частотні методи мають суттєві обмеження. Основним є зниження ефективності при спектральному перекритті сигналу та завади, коли фільтри не можуть чітко відокремити корисний сигнал. Крім того, широкосмугові та адаптивні завади здатні швидко змінювати свої спектральні характеристики, що ускладнює своєчасну перебудову фільтрів. Частотна перебудова має практичні обмеження через регуляторні вимоги, апаратні можливості та затримки зміни частоти. У динамічних умовах це може тимчасово знижувати якість приймання сигналів. Виключне використання частотних методів також не дозволяє ефективно протидіяти завадам зі складною просторовою структурою. Тому частотні методи слід розглядати як необхідний, але недостатній компонент систем протидії РЕБ. Їх максимальна ефективність досягається лише в поєднанні з просторовими та часовими методами, що створює основу для комплексних просторово-частотних підходів до пригнічення завад.

Просторово-частотні методи як комплексний підхід. Просторово-частотні методи фільтрації та пригнічення завад ґрунтуються на одночасному використанні просторових і спектральних характеристик сигналів, що дозволяє реалізувати багатовимірну селекцію корисної інформації. На відміну від однофакторних підходів, просторово-частотна обробка розглядає сигнал як об'єкт, параметри якого змінюються у просторі та частоті, створюючи додаткові ступені свободи для його відокремлення від завад. Суть методу полягає в тому, що просторові підходи використовуються для виділення сигналів за напрямом приходу, а частотні – для фільтрації корисних спектральних компонентів. Поєднання цих методів створює синергетичний ефект: обмеження одного підходу компенсуються перевагами іншого. Наприклад, при спектральному перекритті сигналу та завади просторові методи знижують рівень завад, після чого частотна фільтрація працює значно ефективніше. Синергія просторових і частотних методів особливо важлива в умовах складної радіоелектронної обстановки, коли завади мають багатоконпонентний характер і можуть одночасно змінювати свої просторові та спектральні параметри. Просторово-частотний підхід дозволяє здійснювати селекцію сигналів у багатовимірному просторі ознак, що значно підвищує стійкість системи до адаптивних і інтелектуальних засобів РЕБ. Крім того, такий підхід оптимізує використання апаратних і обчислювальних ресурсів. Завдяки попередньому просторовому пригніченню завад зменшується навантаження на частотні фільтри, що дозволяє знизити їх складність і порядок. Це особливо актуально для багатоканальних і багатосмугових систем, де ефективно управління ресурсами має принципове значення.

Таблиця 2

Порівняння просторових, частотних і просторово-частотних методів

Критерій	Просторові методи	Частотні методи	Просторово-частотні методи
Тип пригнічуваних завад	Напрямні	Вузькосмугові	Комбіновані
Стійкість до адаптивних завад	Середня	Низька	Висока
Збереження корисного сигналу	Середнє	Часто порушується	Високе
Масштабованість	Обмежена	Висока	Висока
Загальна ефективність	Середня	Середня	Висока

Адаптивні просторово-частотні алгоритми є логічним розвитком комплексного підходу. Вони динамічно перебудовують як просторові, так і частотні параметри обробки сигналів, оцінюючи заводову обстановку в реальному або квазіреальному часі та оптимізуючи вагові коефіцієнти антен і фільтрів для максимізації відношення сигнал/завада. Перевагою таких алгоритмів є здатність ефективно протидіяти завадам зі змінними характеристиками – маневреним, когнітивним і багатоджерельним. Комплексна адаптація дозволяє реагувати не лише на зміну напрямів завад, а й на трансформацію їх спектральної структури, що істотно підвищує живучість системи у динамічних умовах РЕБ. Порівняно з окремими просторовими або частотними методами, просторово-частотний підхід забезпечує вищий рівень заводостійкості, точності оцінки параметрів сигналу та стабільності функціонування системи. Він дозволяє одночасно пригнічувати декілька джерел завад різної природи і зменшує ймовірність повного блокування каналу зв'язку або спостереження. Саме тому просторово-частотні методи вважаються одним із найперспективніших напрямів розвитку систем протидії РЕБ. Водночас ефективність просторово-частотних методів обмежується кількістю доступних ступенів свободи – числом антенних елементів, шириною робочого спектра та обчислювальними можливостями системи. Якщо завади мають параметри, близькі до корисного сигналу, можливості їх розділення значно зменшуються. Крім того, складність адаптивних алгоритмів може викликати затримки обробки та зниження ефективності у швидкозмінних умовах. Таким чином, просторово-частотні методи є найвищим рівнем еволюції методів фільтрації та пригнічення завад, ефективність яких залежить від балансу між теоретичними можливостями, апаратною реалізацією та адаптивними алгоритмами управління. Саме вони формують основу для розвитку сучасних і перспективних систем протидії радіоелектронній боротьбі.

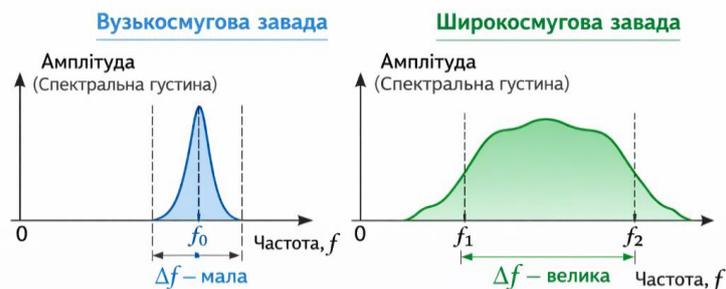


Рис. 3. Частотні методи фільтрації завад

Аналіз ефективності та перспективи розвитку просторово-частотних методів у системах протидії радіоелектронній боротьбі. Просторово-частотні методи фільтрації та пригнічення завад є одними з найкомплексніших і теоретично обґрунтованих



підходів для забезпечення завадостійкості сучасних радіоелектронних систем. Їхня ефективність та напрями подальшого розвитку потребують системного аналізу з урахуванням характеристик завад, параметрів сигналів та вимог до функціонування систем протидії РЕБ. Традиційно ефективність таких методів оцінюють за кількома ключовими критеріями: завадостійкістю, точністю обробки сигналів та швидкодією. Завадостійкість визначає здатність системи забезпечувати приймання та обробку корисного сигналу за наявності інтенсивних і багатокомпонентних завад. Просторово-частотна обробка значно підвищує цей показник завдяки додатковим ступеням свободи, що виникають із просторових і спектральних ознак сигналів. Точність проявляється у стабільності оцінювання параметрів сигналу, таких як напрям приходу, частота та фаза, а швидкодія визначає здатність системи адаптуватися до динамічної зміни радіоелектронної обстановки. Тип завад істотно впливає на ефективність методів. Вузкосмугові та просторово локалізовані завади дозволяють ефективно застосовувати просторово-частотну селекцію, формуючи просторові нулі та виконуючи вибірку спектральну фільтрацію. Широкошмугові та багатоджерельні завади значно ускладнюють пригнічення, проте навіть у таких умовах просторово-частотний підхід залишається більш ефективним порівняно з окремими просторовими чи частотними методами. Особливо складні ситуації виникають, коли параметри завад близькі до корисного сигналу – тоді можливості їх розділення обмежуються на фундаментальному рівні.

Максимальний ефект досягається за умови достатньої кількості антенних елементів, широкого робочого спектра та стабільного оцінювання параметрів завадової обстановки. Важлива узгодженість просторової та частотної обробки: попереднє просторове пригнічення зменшує навантаження на частотні фільтри, а спектральна селекція підвищує ефективність просторових алгоритмів. Таким чином, ефективність просторово-частотного пригнічення значною мірою залежить від архітектури системи та алгоритмів адаптації. Порівняльний аналіз свідчить, що просторово-частотні методи переважають інші підходи в складній і динамічній радіоелектронній обстановці. На відміну від виключно частотних методів, вони залишаються ефективними при спектральному перекритті сигналу та завади, а порівняно з чисто просторовими методами забезпечують додаткову селекцію за спектральними ознаками. Це робить підхід більш універсальним і стійким до адаптивних засобів РЕБ.

Перспективи розвитку методів пов'язані з інтеграцією інтелектуальних алгоритмів обробки сигналів, зокрема методів штучного інтелекту та машинного навчання. Такі підходи дозволяють підвищити ефективність оцінювання параметрів завад і оптимізувати адаптацію в умовах неповної або зашумленої інформації. Розвиток когнітивних радіосистем відкриває можливості самонавчання та прогнозування змін радіоелектронної обстановки, що особливо актуально у сучасних конфліктах. Важливим напрямом є багатоканальні та мережоцентричні системи, де взаємодіє велика кількість передавальних і приймальних вузлів. Тут просторово-частотна обробка може застосовуватися не лише на рівні окремого приймача, а й у межах координації між вузлами мережі, підвищуючи загальну завадостійкість і живучість системи.

Отже, просторово-частотні методи фільтрації та пригнічення завад мають значний теоретичний потенціал і залишаються одними з найбільш перспективних напрямів розвитку систем протидії РЕБ. Подальші дослідження доцільно спрямовувати на розширення моделей, удосконалення адаптивних алгоритмів і пошук оптимального балансу між ефективністю, складністю реалізації та швидкодією.



Таблиця 3

Порівняння складності реалізації методів

Метод	Очислювальна складність	Вмоги до апаратури	Придатність для реального часу
Просторовий	Середня	Антенні решітки	Так
Частотний	Низька	DSP-процесори	Так
Просторово-частотний	Висока	FPGA / GPU	Обмежено

ВИСНОВКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

У статті проведено аналіз просторово-частотних методів фільтрації та пригнічення завад у системах протидії радіоелектронній боротьбі. Узагальнено сучасні підходи до класифікації радіоелектронних завад та методів їхнього пригнічення, а також систематизовано просторові, частотні та комбіновані методи обробки сигналів. Показано, що у умовах інтенсивного та динамічного радіоелектронного впливу традиційні однофакторні підходи мають обмежену ефективність, що зумовлює необхідність застосування багатовимірних методів селекції сигналів.

Теоретичний аналіз підтвердив, що просторово-частотні методи мають суттєві переваги порівняно з окремими просторовими або частотними підходами. Основною перевагою є можливість одночасного використання просторових і спектральних ознак сигналів та завад, що забезпечує підвищену завадостійкість навіть за умов спектрального перекриття або близьких напрямів приходу сигналів. Синергія просторової та частотної обробки дозволяє ефективніше використовувати доступні ступені свободи системи та розширює теоретичні межі пригнічення багатокомпонентних і адаптивних завад.

Отримані результати підкреслюють важливе значення просторово-частотних методів для розвитку сучасних систем протидії радіоелектронній боротьбі. Їх застосування створює науково-методичну основу для побудови завадостійких радіоелектронних систем нового покоління, зокрема у контексті когнітивних, багатоканальних та мережоцентричних архітектур. Теоретичні положення, викладені у статті, можуть бути використані для визначення перспективних напрямів досліджень, спрямованих на вдосконалення адаптивних алгоритмів обробки сигналів та підвищення ефективності функціонування систем протидії РЕБ в умовах сучасних і майбутніх конфліктів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Shohat, R. (2019). Cyber electronic warfare. *Cyber Defense Review*, 4(2), 5–11. <https://doi.org/10.18462/cdr.2019.0402.02>
2. Lozynskyi, V. V. (2018). Electronic warfare in the system of preparation and conduct of combat operations of the Armed Forces of Ukraine. *Armament and Military Equipment*, 2(14), 48–57.
3. Schleher, D. C. (2019). Electronic warfare in the 21st century: Challenges, threats and opportunities. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 13(3), 328–333. <https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2018.5344>
4. Sokolov, V. Y. (2015). Latest technologies of electronic warfare. *Armament and Military Equipment*, 2(14), 48–50.
5. McPeak, W. M., et al. (2015). Design of nanostructured metamaterials for optical magnetometry. *Nature Materials*, 14(4), 395–400. <https://doi.org/10.1038/nmat4221>
6. Balanis, C. A. (2016). *Antenna theory: Analysis and design* (4th ed.). Wiley.



7. Opirskyy, I., & Bybyk, R. (2023). Research on modern methods of electronic warfare (EW) and methods and means of its counteraction. *Ukrainian Scientific Journal of Information Security*, 29(2), 88–97. <https://doi.org/10.18372/2225-5036.29.17873>
8. Adamczyk, B. (2017). Rapidly varying electromagnetic fields. In *Foundations of electromagnetic compatibility: With practical applications* (pp. 439–452). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119120810.ch15>
9. Piza, D. M., & Moroz, G. V. (2022). Method for spatial polarization compensation of jamming. <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2022-2-3>
10. Schuerger, J., & Garmatyuk, D. (2010). Multifrequency OFDM SAR in presence of deception jamming. <https://doi.org/10.1155/2010/451851>
11. Kriuchkova, L., & Vorokhob, N. (2025). Adaptive methods for countering active noise jamming. <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2025.30.987>

**Roman Bybyk**

Assistant of the Department of Information Protection
Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine
ORCID: 0000-0002-9506-014X
roman.t.bybyk@lpnu.ua

Artem Stefankiv

Assistant of the Department of Information Protection
Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine
ORCID: 0009-0006-8851-8358
artem.stefankiv.mkbas.2024@lpnu.ua

RESEARCH ON SPATIAL-FREQUENCY METHODS OF FILTERING AND JAMMING SUPPRESSION IN ELECTRONIC WARFARE COUNTERMEASURE SYSTEMS

Abstract. The article presents a theoretical analysis of spatial-frequency methods for filtering and jamming suppression in electronic warfare countermeasure systems. The main types of electronic jamming and their impact on the operation of modern communication, radar, and navigation systems are considered. The principles of spatial and frequency signal selection, as well as the features of their combined application to enhance jamming resistance, are analyzed. Special attention is given to adaptive spatial-frequency algorithms that provide effective suppression of both narrowband and broadband jamming under conditions of intensive electronic interference. A comparative analysis of spatial-frequency methods with individual spatial and frequency approaches is conducted, highlighting their advantages, limitations, and theoretical efficiency boundaries. Prospective directions for the development of spatial-frequency signal processing in the context of cognitive radio systems and integration with artificial intelligence methods are outlined. The obtained results can be used for further theoretical research and improvement of electronic warfare countermeasure systems.

Keywords: electronic warfare, jamming resistance, jamming filtering, spatial methods, frequency methods, spatial-frequency processing, adaptive algorithms.

REFERENCES (TRANSLATED AND TRANSLITERATED)

1. Shohat, R. (2019). Cyber electronic warfare. *Cyber Defense Review*, 4(2), 5–11. <https://doi.org/10.18462/cdr.2019.0402.02>
2. Lozynskiy, V. V. (2018). Electronic warfare in the system of preparation and conduct of combat operations of the Armed Forces of Ukraine. *Armament and Military Equipment*, 2(14), 48–57.
3. Schleher, D. C. (2019). Electronic warfare in the 21st century: Challenges, threats and opportunities. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 13(3), 328–333. <https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2018.5344>
4. Sokolov, V. Y. (2015). Latest technologies of electronic warfare. *Armament and Military Equipment*, 2(14), 48–50.
5. McPeak, W. M., et al. (2015). Design of nanostructured metamaterials for optical magnetometry. *Nature Materials*, 14(4), 395–400. <https://doi.org/10.1038/nmat4221>
6. Balanis, C. A. (2016). *Antenna theory: Analysis and design* (4th ed.). Wiley.
7. Opirskyy, I., & Bybyk, R. (2023). Research on modern methods of electronic warfare (EW) and methods and means of its counteraction. *Ukrainian Scientific Journal of Information Security*, 29(2), 88–97. <https://doi.org/10.18372/2225-5036.29.17873>
8. Adamczyk, B. (2017). Rapidly varying electromagnetic fields. In *Foundations of electromagnetic compatibility: With practical applications* (pp. 439–452). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119120810.ch15>
9. Piza, D. M., & Moroz, G. V. (2022). Method for spatial polarization compensation of jamming. <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2022-2-3>



10. Schuerger, J., & Garmatyuk, D. (2010). Multifrequency OFDM SAR in presence of deception jamming. <https://doi.org/10.1155/2010/451851>
11. Kriuchkova, L., & Vorokhob, N. (2025). Adaptive methods for countering active noise jamming. <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2025.30.987>

Отримано редакцією журналу / Received: 04.01.26
Прорецензовано / Revised: 21.02.26
Схвалено до друку / Accepted: 26.03.26

